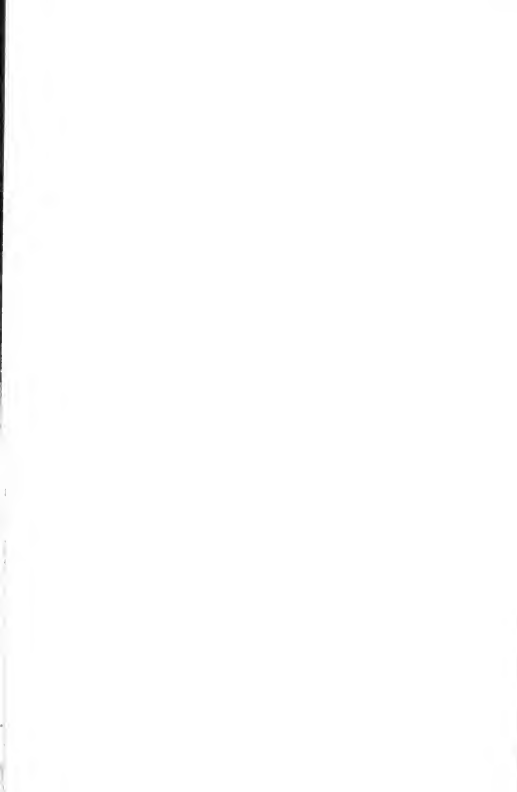


Современные ТЕЛЕСКОПЫ









Annual Reviews Monograph

Telescopes for the 1980s

EDITED BY G. BURBIDGE AND A. HEWITT

Annual Reviews Inc. 4139 El Camino Way Palo Alto,
California 94306 USA

Современные ТЕЛЕСКОПЫ

Под редакцией
Дж. БЕРБИДЖА и А. ХЬЮИТ

Перевод с английского
канд. физ.-мат. наук
А. А. ТОКОВИНИНА

под редакцией
д-ра физ.-мат. наук
Э. А. ДИБАЯ

Д. Хишен, Дж. Беккерс, Б. Улих, Р. Шэннон, Н. Карлтон, Дж. Гири, Д. Латам, Дж. Эйнджел, У. Хоффман, Ф. Лоу, Р. Вейманн, Н. Вульф, Ч. О'Делл, Р. Джаккони, П. Горенштейн, С. Мюррей, И. Шрейер, Ф. Сьюард, Х. Таненбаум, У. Таккер, Л. Ван Спейбрук.

Современные телескопы: Под ред. Дж. Бербиджа, А. Хьюит/
Пер. с англ.— М.: Мир, 1984.— 312 с., ил.

Авторы коллективной монографии, видные американские специалисты по космической технике, оптике и астрономии, описывают историю создания, конструктивные особенности и рабочие характеристики четырех самых крупных астрономических инструментов США 80-х годов: многоэлементного радиотелескопа VLA, многозеркального оптического/инфракрасного телескопа, большого космического телескопа и рентгеновской обсерватории им. Эйнштейна. Приводятся некоторые результаты наблюдений и их интерпретация.

Книга рассчитана на астрономов, оптиков и инженерно-технических работников, занимающихся разработкой различных оптических систем, в том числе прикладного назначения, а также на студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

С 1705010000—235
041(01)—84 82-84, ч. 1

ББК 22.6
52

Редакция литературы по космическим исследованиям, астрономии и геофизике

© 1981 by Annual Reviews Inc.,
Palo Alto, California, USA

© Перевод на русский язык, «Мир»,
1984

Предисловие редактора перевода

Астрономия издавна считалась наблюдательной наукой. Но в наши дни это классическое утверждение, по-видимому, нуждается в пересмотре. В самом деле, термин «наблюдение» в отличие от понятия «эксперимент» подразумевает пассивный (дистанционный) сбор информации о данном объекте. Действительно, большинство астрономических объектов, таких, как звезды и галактики, недоступно вмешательству с Земли. Однако электромагнитное *излучение* астрономических объектов подвергается самому активному воздействию со стороны исследователей. Это излучение разлагается в спектр, в нем выделяются с помощью фильтров те или иные участки, измеряется поляризация, проводится интерферометрия и т. д. В ряде случаев для измерения недоступных с Земли участков спектра (ультрафиолетовых, рентгеновских, инфракрасных) аппаратура выносятся за пределы земной атмосферы. Эта часть процесса измерения с полным правом заслуживает названия астрофизического эксперимента.

Изложенные соображения до некоторой степени объясняют тот интерес и внимание, которые проявляются к проблемам развития эксперимента, в том числе в сфере создания телескопов и приемной аппаратуры. Многие астрономические телескопы уникальны, поэтому строительство каждого крупного инструмента является важным событием в науке. Здесь очевидна параллель с созданием крупных ускорителей в ядерной физике.

Современная астрономия характеризуется (среди прочих) двумя важнейшими особенностями. Во-первых, измерения ведутся сейчас в крайне широком диапазоне электромагнитного спектра, от радио- до рентгеновского излучения. Во-вторых, проявляется пристальный интерес ко все более и более слабым объектам, что в свою очередь требует увеличения размеров телескопов и повышения чувствительности аппаратуры.

Книга «Современные телескопы», предлагаемая вниманию читателя в русском переводе, отличается стремлением охватить весь спектр проблем современного телескопостроения. В ней рассказано о создании крупного радиоастрономического телескопа, инфракрасного (а также оптического) составного теле-

скопа, космического телескопа (пока проект) и уже ставшей знаменитой рентгеновской орбитальной обсерватории им. Эйнштейна. В советской литературе нет аналогичной книги со столь полным охватом затронутых проблем. Небольшие статьи, посвященные многозеркальному и космическому телескопам, имеются в переводных сборниках, опубликованных ранее издательством «Мир» («Оптические телескопы будущего» под ред. Ф. Пачини, В. Рихтера и Р. Вильсона, 1981 г.; «Оптические и инфракрасные телескопы 90-х годов» под ред. А. Хьюит, 1983 г.).

Книга начинается с описания многоэлементного радиотелескопа VLA. Необходимость его создания вытекает из ряда соображений, одним из которых является следующее фундаментальное различие между оптическими и радиотелескопами. Именно: размер изображения (в радианах), даваемый системой, воспринимающей электромагнитное излучение, по порядку величины составляет $\sim \lambda/D$, где λ — длина волны и D — характерный размер системы (зеркала). Практически все существующие радиотелескопы дают изображения, существенно большие, чем у оптических телескопов. Иногда говорят, что радиоастрономы не видят того, что измеряют. Конструкторы VLA поставили своей целью разработать радиотелескоп, способный в этом отношении конкурировать с оптическими телескопами. Размеры такой системы при наблюдениях на сантиметровых волнах должны составлять десятки километров! Ясно, что такая система по необходимости должна быть многоэлементной и использовать в той или иной степени методы апертурного синтеза, развитые М. Райлом. Напомним, что телескоп М. Райла в Кембридже состоит из 8 зеркал, расположенных в линию и дающих на волне 6 см разрешение 2". Для заполнения апертуры используется вращение Земли. Трехлучевая компоновка телескопа VLA позволяет получать мгновенную карту распределения яркости объекта (этот метод образно назван «моментальной фотографией»). При реализации столь обширного и многостороннего проекта пришлось преодолевать множество трудностей. Читатель оценит ситуацию, в которой оказалась администрация проекта, вынужденная оплачивать археологические раскопки на месте будущего строительства.

Второй большой телескоп, описанный в книге — многозеркальный телескоп МЗТ, — интересен тем, что в его конструкции заложен принцип, который, по-видимому, в значительной степени будет определять собой конструктивные особенности телескопов будущего. Дело в том, что в оптических телескопах, так же как в радиодиапазоне, увеличение апертуры возможно лишь на пути перехода к многоэлементным системам. Первоначально МЗТ был задуман как инфракрасный телескоп; однако качество оптики и, главное, качество юстировки зеркал, оказа-

лось столь высоким, что МЗТ удалось использовать и как оптический телескоп. Оснащенный целым рядом разнообразных приборов, МЗТ является, по сути дела, целой обсерваторией. Аналогичные проекты составных оптических телескопов изучаются и в других странах. Укажем на упоминаемый в книге проект 25-метрового многоэлементного телескопа, разрабатываемый в СССР.

Третий телескоп, описываемый в книге, а именно космический телескоп, находится еще в стадии изготовления. Вместе с тем ожидается, что в конце 80-х годов этот телескоп станет основным астрономическим инструментом нашего времени. Большое внимание уделено кругу научных проблем, которые можно будет решать с этим телескопом. Как можно ожидать, предельная звездная величина объектов, регистрируемых в главном фокусе, достигнет 27^m при угловом разрешении лучше $0,1''$. Если добавить к этому, что вынос телескопа за пределы атмосферы снимает все ограничения на спектральный интервал, станет ясным, что возможности космического телескопа позволяют существенно расширить круг изучаемых объектов и явлений. Следует отметить, что в 1983 г. в СССР был запущен на орбиту космический телескоп с диаметром зеркала 80 см, снабженный УФ-спектрографом и двумя рентгеновскими счетчиками (комплекс «Астрон»). С этим инструментом уже ведутся наблюдения астрофизических источников, в том числе рентгеновских компонентов двойных звезд, ядер галактик и квазаров.

Заключительная глава книги посвящена рентгеновской обсерватории им. Эйнштейна. Необходимость создания рентгеновского телескопа диктуется теми же соображениями, что и в случае телескопа VLA. Напомним, что первые рентгеновские приемники, установленные на ракетах и спутниках (самый известный из них спутник «Ухуру»), не позволяли строить изображения, а без оптического отождествления нельзя было сделать какие-либо заключения о природе излучающего объекта. В обсерватории им. Эйнштейна достигнута возможность получения рентгеновских изображений с разрешением не хуже $2''$. С этим телескопом получен целый ряд важных результатов. Укажем на выявление рентгеновских источников в центральных частях шаровых скоплений, наблюдения квазаров, остатков Сверхновых в нашей и других галактиках. Особенно интересными представляются рентгеновские наблюдения далеких скоплений галактик, существенно расширившие наше понимание процессов, протекающих в этих, по-видимому, наибольших по масштабам гравитирующих системах.

Изложенная картина будет неполной, если не упомянуть о крупнейшем в мире 6-метровом телескопе БТА Специальной астрофизической обсерватории АН СССР. При создании этого

инструмента был реализован целый ряд принципиально новых конструктивных решений. Подробное описание БТА приводится в материалах международного симпозиума, состоявшегося в САО АН СССР, в частности в статье Б. К. Иоанниссани и др. (сборник "Instrumentation for astronomy with large optical telescopes", IAU Coll. 67, D. Reidel, 1982, стр. 3).

Впервые в практике оптического телескопостроения применена альтазимутальная монтировка. Похоже, что после успешной реализации в 6-метровом телескопе эта идея начинает завоевывать популярность. Так, строящийся в Англии 4,2-метровый телескоп им. Гершеля также будет смонтирован на азимутальной монтировке. Ее преимуществом является большая стабильность по отношению к гнутиям. Оси БТА вращаются на гидростатических подшипниках. Слежение осуществляется одновременно по двум осям под контролем ЭВМ, при этом зона зенита ($z < 5^\circ$) недоступна наблюдениям.

Труба телескопа осуществлена по схеме Серрьюре (фокусное расстояние 24 м). На конце трубы находятся кабина главного фокуса, содержащая стол для приборов, вторичное гиперболическое зеркало и линзовый корректор. Смена зеркал осуществляется автоматически. Большая часть аппаратуры располагается на двух балконах в фокусе Нэсмита. Главное зеркало весом 42 т отличается высокими оптическими качествами, концентрируя 80 % света в кружке диаметром 0,6" (90 % в кружке диаметром 0,8"). Точность гидирования фотоэлектрическим устройством не хуже 0,2 диаметра звезды.

Телескоп оснащен обширным комплексом светоприемной и спектральной аппаратуры. Трехкамерный основной звездный спектрограф обеспечивает набор дисперсий 1,5; 5; 9; 14; 28 и 56 А/мм в диапазоне 3000—11 000 А. С его помощью решаются самые разнообразные задачи звездной астрофизики. Для спектров слабых объектов служит спектрограф в главном фокусе с электронно-оптическим преобразователем, с дисперсиями 60, 127 и 360 А/мм. Для регистрации сигналов на БТА успешно применяются фотоэлектрические и телевизионные методы.

Регулярные наблюдения с 6-метровым телескопом ведутся с 1976 г. Распределением времени ведает специальный Комитет по научной проблематике БТА; таким образом, 6-метровый телескоп имеет статус национального телескопа. За время работы с БТА выполнен целый ряд фундаментальных исследований. Так, с помощью ТВ-сканера получены спектры и прослежена динамическая эволюция уникальной системы SS 433; при спектральных обзорах выявлено несколько десятков новых сейфертовских галактик и квазаров; с помощью фотометрической системы МАНИЯ, рассчитанной на изучение сверхбыстрой переменности на интервалах времени до $3 \cdot 10^{-7}$ с, обнаружены удивитель-

ные фотометрические особенности поведения оптического пульсара в Крабовидной туманности.

По-видимому, заслуживает также упоминания любопытный проект создания нового уникального многоэлементного радиотелескопа, получивший название «Полигам». На начальной стадии проектом предусматривается установка на территории СССР трех полноповоротных телескопов диаметром 64—70 м. В дальнейшем к ним можно будет подключать и другие антенны. Синхронизацию сигналов антенн предполагается осуществлять через геостационарный спутник связи. С помощью такого интерферометра можно будет решать самые разнообразные задачи из области астрометрии, движения Земли, астрофизики и космологии (В. А. Алексеев и др. Сообщения Специальной астрофизической обсерватории, вып. 27, 28, 1980).

В заключение отмечу, что эта монография рассчитана на научных работников, астрономов — практиков. Она представляет большой интерес также для представителей смежных профессий — физиков и инженеров, интересующихся проблемами создания оптических систем. Ее можно также рекомендовать преподавателям астрономии в университетах и педагогических вузах для использования в курсах общей астрономии и общей астрофизики. С пользой для себя ее прочтут аспиранты и студенты, а также все интересующиеся увлекательными проблемами наблюдательной астрофизики.

Э. А. Дибай

Предисловие

Предлагаемая вниманию читателя монография содержит обзор истории создания, конструирования и практической реализации последнего поколения телескопов США — радиотелескопа, оптического/инфракрасного телескопа, рентгеновского телескопа и первого большого космического телескопа. Этим новым инструментам уделяется особое внимание, поскольку астрономия является наблюдательной, а не экспериментальной наукой. Это значит, что мы не можем планировать эксперименты, в которых граничные и начальные условия находились бы под нашим контролем. Мы можем лишь пассивно наблюдать различные типы излучения, испускаемого небесными телами. Прогресс наших исследований в значительной степени зависит от наличия эффективных методов для регистрации и анализа фотонів по всему электромагнитному спектру.

Вплоть до 40-х годов вся наблюдательная астрономия была ограничена диапазоном длин волн от 3000 до 7000 Å, который астрономы обычно называют оптическим. В основе достижений оптической астрономии первой половины XX в. лежали два фактора: строительство крупных телескопов в местах с хорошим астроклиматом и постоянное развитие вспомогательного оборудования, в частности фотографических эмульсий все более высокого качества.

В течение примерно пятидесяти лет оптическая астрономия испытывала значительный прогресс, который был связан с созданием Ликской обсерватории в конце XIX в., строительством 60- и 100-дюймового телескопов обсерватории Маунт-Вилсон в первые два десятилетия XX в., строительством Паломарского 200-дюймового телескопа в 20-х годах (завершено в 1948 г.) и созданием обсерватории Мак-Дональд с ее 82-дюймовым рефлектором в 30-х годах. Все эти телескопы были расположены на горных вершинах с хорошим астроклиматом в юго-западной части США. Новые телескопы, а также улучшение характеристик вспомогательного оборудования послужили основой для беспрецедентного роста научных исследований, которые привели к современной картине наших представлений о Вселенной.

После перерыва, вызванного второй мировой войной, за следующие 35 лет появилось новое поколение крупных, а также малых отражательных телескопов, преимущественно в местах с хорошим астроклиматом. В США телескопы диаметром 2—4 м появились на Ликской обсерватории, в Университете штата Аризона, на обсерватории Мак-Дональд, на обсерватории Мауна-Кеа на Гавайских о-вах (два телескопа, один из которых специализируется на инфракрасных наблюдениях), на инфракрасной обсерватории на горе Джелм в штате Вайоминг, на Национальной обсерватории Китт-Пик (два телескопа). Вне США ранее были построены телескопы с диаметром около 2 м в Австралии (Маунт-Стромло), в Южной Африке (обсерватория Радклифф) и в Канаде (обсерватория Дэвид Дэнлоп, Торонто). В странах северной Европы становилось все более и более очевидным, что большие телескопы надо строить за рубежом, в местах с хорошим астроклиматом. Первыми начали англичане, но они сразу же допустили ошибку, установив 100-дюймовый телескоп (имени Исаака Ньютона) практически на уровне моря в Южной Англии. Спустя примерно 30 лет телескоп пришлось переместить на обсерваторию Лас-Пальмас на Канарских о-вах. В 70-х годах Англия и Австралия совместно построили англо-австралийский телескоп, превосходный инструмент диаметром 3,9 м на обсерватории Сайдинг-Спрингс в Новом Южном Уэльсе (Австралия). Примерно в то же время ФРГ, Франция, Голландия, Бельгия, Дания и Швеция объединили свои усилия для строительства крупного 3,6-метрового телескопа на Южной Европейской обсерватории на горе Ла-Силла в Чили. Канада и Франция установили рефлектор диаметром 3,8 м на Гавайских о-вах. ФРГ создала национальную обсерваторию Калар-Альто в Испании, где предполагается иметь два телескопа 2,2 и 3,5 м в диаметре. Астрономы США, понимая свое отставание в исследовании южного неба, поставили телескопы диаметром 4 м на обсерватории Серро-Тололо и 2,5 м на обсерватории Лас-Кампанас.

В тот же самый период были построены три больших рефлектора в СССР: 6-метровый телескоп на Северном Кавказе и два рефлектора диаметром 2,6 м, один в Крыму, а другой в Бюракане (Армения). Все эти телескопы, как и многие другие, наряду с высокоэффективным вспомогательным оборудованием существенно увеличили наши возможности изучения Вселенной в оптическом диапазоне.

Полноправной ветвью астрономии в этот период стала инфракрасная астрономия. Однако здесь первые шаги были сделаны не в строительстве специализированных телескопов, а в разработке детекторов инфракрасного излучения. В последующем было построено довольно много средних телескопов

с диаметром 1,5 м; в последнее время специально для целей инфракрасной астрономии были созданы большие телескопы в Университете шт. Вайоминг, инфракрасный телескоп НАСА и английский инфракрасный телескоп (два последних на обсерватории Мауна-Кеа на Гавайских о-вах).

В тот же самый период велось проектирование ряда телескопов, как одиночных, так и многоэлементных, для исследования радиообласти спектра. Хотя первые радиотелескопы были сконструированы Янским и Ребером в США еще в 30-е годы, реальная исследовательская активность в этой области началась после войны с успешным вводом в эксплуатацию инструментов в Англии (Джодрелл-Бэнк в Манчестере, Кавендишская лаборатория в Кембридже), в Австралии (Паркс, Молонгло и Флерс), в Голландии (Вестерборк). В США радиоастрономические обсерватории были построены в Оуэнс-Вэлли и Хэт-Крик (Калифорния), в Грин-Бэнк (Западная Вирджиния), около Мэрфа (Техас), на вершине Китт-Пик (Аризона), в Мюррей-Хилле (Нью-Джерси), в штатах Мичиган, Огайо и Массачусетс (две), а также в Аресибо (Пуэрто-Рико). Другие обсерватории были построены в ФРГ (Бонн), Италии (Болонья), Индии (Оотакамунд) и СССР (близ Ленинграда). Эти устройства представляют широкий набор одиночных антенн, интерферометров и многоэлементных антенн, позволяющих регистрировать излучение источников в диапазоне длин волн от метров до миллиметров. Относительно недавно разработаны планы строительства больших антенн миллиметрового диапазона в ФРГ (общество им. Макса Планка), Японии, Франции и Великобритании.

За короткий промежуток времени около 25 лет радиоастрономия радикально изменила наши представления о процессах во Вселенной. В то же время стало ясно, что оптическая и радиоастрономия должны действовать согласованно. Дело в том, что радиоастрономы, когда они обнаруживают тот или иной источник, в сущности не знают, что они наблюдают или где этот источник расположен, пока он не будет отождествлен и изучен с помощью оптических телескопов.

Расширение исследований Вселенной на более коротких длинах волн, в ультрафиолетовом и рентгеновском участках спектра, требует выхода за пределы земной атмосферы. Первые наблюдения такого рода были выполнены с ракет в течение послевоенного двадцатилетия, но тогда времена экспозиций по необходимости были невелики. Прогресс в этой области начался лишь после запуска искусственных спутников. Ультрафиолетовые наблюдения были проведены с помощью орбитальных астрономических обсерваторий ОАО, спутника «Коперник» и международного ультрафиолетового спутника IUE. Первым

большим спутником, оснащенным для рентгеновских наблюдений, стал спутник «Ухуру».

Развитие рентгеновской астрономии прошло путь, аналогичный радиоастрономии, поскольку и в этом случае для полного исследования открытых объектов также требуются наблюдения на оптических телескопах.

По сравнению с исследованиями в этих областях спектра гамма-астрономия находится в начальной стадии своего развития, а нейтринная астрономия и гравитационно-волновая астрономия пребывают еще в зачаточном состоянии.

В 80-е годы в радио-, инфракрасной, оптической, ультрафиолетовой и рентгеновской астрономии мы достигли качественно нового уровня знаний. Огромное количество информации, полученной за последние 30 лет, соответствует значительному прогрессу в создании новых инструментов и усовершенствовании вспомогательного оборудования.

Представленные в этой монографии статьи содержат данные, касающиеся истории, планирования и строительства телескопов позднейшего поколения — радиотелескопа, оптического/инфракрасного телескопа, рентгеновского телескопа и первого большого космического телескопа. Все они отличаются друг от друга по научной проблематике. Два из этих телескопов являются наземными, а два — космическими. Три из них полностью финансировались правительством США, тогда как четвертый, а именно многозеркальный телескоп, финансировался частично университетами, а частично правительством (через Смитсоновский институт). Таким образом, создание инструментов, описываемых в этой книге, почти полностью обеспечивалось правительственными ассигнованиями. Такая ситуация характерна для большинства астрономических проектов, завершенных после войны. Лишь два из послевоенных телескопов — 3-метровый инструмент Ликской обсерватории и 2,5-метровый телескоп обсерватории Лас-Кампанас — были построены на средства, выделенные штатами, или на частные пожертвования. Для сравнения можно отметить, что все большие оптические телескопы первой половины XX века были построены на частные средства.

Это изменение характера финансирования привело к расширению материальной основы астрономических проектов и вместе с тем к увеличению зависимости от единственного источника финансирования. Теперь требуется, по крайней мере в США, гораздо большая поддержка того или иного проекта научной общественностью. Роль отдельных ученых, кто мог бы добиться финансирования, возглавить проект и довести дело до завершения (как, например, Дж. Хейл и О. Струве в США), существенно уменьшилась. В наше время такие яркие индивидуальности уступают место группам ученых или специальным коми-

тетам. Все большее значение, особенно в космических исследованиях, приобретают политические мотивы.

Авторы статей этой книги работают в различных областях астрономии. Все они внесли большой вклад в проектирование и строительство телескопов, о которых пишут. Мы признательны им за подробное описание различных этапов претворения соответствующих проектов в жизнь, включая упоминание встречающихся трудностей и препятствий. Правда, один из этих проектов, а именно космический телескоп, еще не завершен. Мы надеемся, что статьи, приведенные в этой книге, не только покажут читателю, как сложно и трудно реализовать большие проекты, но и будут полезны тем, кто обдумывает новые проекты, завершения которых можно ожидать лишь в конце нашего столетия.

Март 1981 г.

*Дж. Бербидж
А. Хьюит*

МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЙ РАДИОТЕЛЕСКОП VLA

Д. С. Хишен¹

1. Введение

После того как в 1954 г. мощный радиоисточник Лебедь А был отождествлен с далекой пекулярной галактикой, довольно быстро стали очевидными два направления дальнейших исследований. Во-первых, высокая интенсивность радионизлучения, а также его распределение в двух областях, расположенных симметрично относительно центральной галактики, свидетельствовали о явлениях, связанных с выделением огромного количества энергии, заставляя задуматься о физическом состоянии вещества в таких галактиках. Во-вторых, большая мощность радионизлучения позволяла предполагать, что подобные объекты можно выявлять на гораздо больших расстояниях, чем ранее было доступно наблюдениям. Таким образом, стало ясно, что «радиогалактики» могут оказаться эффективными «зондами» для исследования весьма далеких областей Вселенной. Эти два обстоятельства в значительной степени повлияли на научную проблематику и инструментальное развитие радиоастрономии того времени.

В начале шестидесятых годов стало ясно, что существующие радиотелескопы, особенно в США, неспособны обеспечить дальнейшее развитие внегалактических исследований. Лишь интерферометр из двух 90-футовых зеркал обсерватории Оуэнс-Вэлли выдерживал сравнение с европейским и австралийским радиотелескопами. Ни один из инструментов в мире не имел чувствительности и разрешающей способности, необходимых для развития исследований галактик, как, впрочем, и для разработки других радиоастрономических проблем. Отсутствие возможности строить прямые изображения, присущей оптическим телескопам с применением фотографической эмульсии, делало радионаблюдения трудными и малоэффективными.

Появление все новых научных проблем, с одной стороны, и наличие инструментальных ограничений, — с другой, побудили многие организации и отдельных астрономов к созданию новых радиотелескопов. В результате предпринятых усилий возникло

¹ National Radio Astronomy Observatory, Charlottesville, Virginia 22901, USA.

поколение больших радиотелескопов семидесятых годов, таких, как системы апертурного синтеза в Кембридже [35] и Вестерборке [17]. Это же направление развития привело к выдающемуся телескопу восьмидесятых годов — системе VLA¹.

Создание телескопа VLA было мотивировано четко осознанной в начале шестидесятых годов необходимостью иметь инструмент, способный строить изображения и обладающий при этом максимально возможным разрешением, чувствительностью и гибкостью. Конструкторы телескопа в основном ориентировались на проблемы внегалактической астрономии, хотя было ясно, что такой инструмент может быть полезен и для других направлений радиоастрономических исследований. Фактически VLA оказался универсальным инструментом радиоастрономии.

VLA образует систему из 27 индивидуальных 25-м антенн, расположенных по трем направлениям в виде буквы Y или трехлучевой звезды (рис. 1). По суммарной площади, углу обзора неба и характеристикам диаграммы направленности система VLA эквивалентна полноповоротному параболоиду диаметром 130 м, тогда как по разрешению VLA соответствует 25 000-м параболоиду. Телескоп может работать в любом из четырех спектральных интервалов от 20 до 1,3 см. Для обеспечения достаточной чувствительности и разрешения при наблюдениях протяженных источников и для решения различных задач индивидуальные антенны могут перемещаться по рельсам вдоль соответствующих лучей. Телескоп VLA расположен на плато Сан-Агустин (высота над уровнем моря 2135 м), удаленной и пустынной местности в 90 милях к юго-западу от Альбукерке (шт. Нью-Мексико, США).

Чувствительность и разрешение VLA в 10—100 раз выше, чем у любого существующего радиотелескопа; по разрешающей способности этот телескоп сравним и даже превосходит (в зависимости от используемой длины волны) оптические телескопы. Его высокая эффективность, большой угол обзора неба, способность измерять поляризацию и выполнять спектроскопические наблюдения с высоким частотным разрешением делают его чрезвычайно мощным и гибким инструментом для решения самых разнообразных проблем. Как прибор, способный строить изображения, он не имеет в радиоастрономии конкурентов, и такое положение сохранится еще в течение длительного времени. Можно ожидать, что телескоп VLA окажет сильное влияние на развитие радиоастрономии в восьмидесятые и последующие годы.

¹ VLA расшифровывается как "Very Large array", или «Очень большая многоэлементная система». Поскольку в астрономической литературе такое обозначение стало общеупотребительным, оно принято и в этой книге.—
Прим. ред.



Рис. 1. Вид с воздуха центральной части VLA (1—2 км). Показаны Y-образная трехлучевая система рельсовых путей и некоторые из антенн. Рельсы тянутся от центра на расстояние до 21 км. Каждая антенна может быть смещена от главного луча на небольшой отрезок, ведущий к месту ее установки. Пустые фундаменты для антенн, заметные на рисунке, предназначены для использования системы в наиболее компактной конфигурации. При наименее компактной конфигурации антенны располагаются на расстояниях вплоть до 21 км от центра.

Первоначальное обсуждение проектов и замыслов, приведших к созданию VLA, началось на Национальной радиоастрономической обсерватории (НРАО) в 1961 г. Детальная разработка проекта началась в 1964 г., а первое обращение в Национальный научный фонд США с просьбой о финансировании было сделано в 1967 г. Проект был одобрен в 1972 г., и в 1973 г. началось строительство телескопа. Особенности конструкции VLA позволили вводить систему в строй поэтапно; финансирование по графику предполагалось завершить в 1981 г. В момент написания этих строк (январь 1981 г.) система антенн близка к завершению, так что строительство завершится в запланированное время (1981 г.). Частичное использование готовых антенн для ряда научных исследований началось уже в 1977 г.

Примерная хронология различных этапов создания VLA приведена в табл. 1. В тексте обсуждаются не все мероприятия, упомянутые в таблице. В частности, не затронуты многочисленные обсуждения как научной проблематики, так и конструкции VLA различными комитетами. Тем не менее все комитеты, перечисленные в таблице, имеют к VLA то или иное отношение.

Более подробные сведения можно получить из ссылок, приведенных в таблице.

В разд. 2 обсуждаются исходные параметры и принципы устройства телескопа VLA вместе с отдельными инженерными проблемами и их решениями. Кратко описаны принципы апертурного синтеза, которые положены в основу конструкции телескопа, а также проблемы, связанные с выбором места для его

Таблица 1

Хронология создания VLA

Дата	Событие
1961—1963	Предварительная исследовательская работа
1961	Сообщение консультативного совета Национального научного фонда по большим радиотелескопам [27]
1962	Появилось название «Очень большая многоэлементная система» (VLA)
1964	Сообщение «Комитета Уитфорда» [22] Начато строительство интерферометра обсерватории Грин-Бэнк
1964—1967	Организована проектная группа VLA
1965	Интесивная разработка проекта Образован Комитет по научной проблематике НРАО
1966	Первое посещение сотрудниками НРАО плато Сан-Агустин
1967	Распространен первый бюллетень VLA Напечатаны I и II тома «Предложений по созданию VLA» [28] В качестве места установки VLA выбрано плато Сан-Агустин
1967—1969	Первое заседание «Комитета Дикке» [28] Дальнейшие проектные работы. Роспуск проектной группы в 1969 г.
1969	Напечатан III том «Предложений по созданию VLA» [25] Второе заседание «Комитета Дикке» [29]
1971	Сформулированы рекомендации «Комитета Гринстейна» [23] Утвержден проект VLA Ходатайство в пользу VLA перед Национальным научным фондом со стороны Стэнфордского исследовательского института [37]
1972	Опубликован IV том «Предложений по созданию VLA» [26] Организована административная группа по руководству строительством во главе Дж. Г. Ланкастером Выделены средства на строительство VLA. Открыто финансирование
1973	Подписан контракт на изготовление антенн
1974	Начались строительные работы на месте
1975	Исследовательская группа VLA переехала в шт. Нью-Мексико
1976	На месте заработал двухантенный интерферометр Специальное заседание консультативного совета Национального научного фонда по проблемам VLA [30]
1977	Начались научные исследования с помощью шести антенн
1979	Завершен монтаж 28 антенн
1981	Закончены все работы по созданию VLA.

установки. В разд. 3 описаны главные элементы системы: антенны, система подвижек зеркал, электроника, волноводы и ЭВМ. В этих двух разделах основное внимание уделяется скорее принципам функционирования тех или иных элементов, чем их техническому устройству. В разд. 4 описаны основные моменты и стадии проектирования. Параметры и характеристики частично завершенной системы приведены в разд. 5. В разд. 6 даны некоторые примеры уже выполненных работ вместе с прогнозами на будущее.

2. Исходные параметры и принципы устройства

Обсуждение принципов устройства VLA началось в начале шестидесятых годов с общей дискуссии относительно возможностей наблюдений внегалактических объектов. Достаточно ли известны характеристики источников, чтобы пойти дальше разговоров об общем направлении исследований? Какой угол обзора неба, эффективность и разрешение были бы желательны? Эти вопросы нередко были весьма спорными и служили темой ожесточенных дискуссий как внутри, так и вне НРАО в течение десяти — двенадцати лет, вплоть до начала монтажа VLA. Суть этих дискуссий оказала сильное влияние на тип и стоимость телескопа.

Исследовательская проектная группа НРАО сосредоточила усилия на том типе телескопа, который впоследствии был реализован. При этом, в частности, учитывалось, что телескоп будет иметь статус «общенационального», то есть будет использоваться высококвалифицированными специалистами для реализации их программ, и, следовательно, должен быть гибким и разносторонним. Однако главными были все же научные соображения. В самом деле, в то время было довольно мало известно относительно радионисточников, как галактических, так и внегалактических, но было ясно, что они обладают широким набором характеристик. С другой стороны, любой существующий телескоп мог измерять лишь небольшое число параметров источников. Другими словами, динамический диапазон радиотелескопов был существенно меньше возможного диапазона свойств объектов. Это вызывало сильные эффекты селекции почти во всех массивах радиоданных. Далее, большинство телескопов в той или иной мере страдали от сложных конфигураций диаграммы направленности, вызывающих трудности при пространственном разрешении. Помимо ограничения динамического диапазона эти эффекты затрудняли интерпретацию данных измерений. С учетом этих трудностей казалось нежелательным ограничивать параметры телескопа до тех пор, пока технические и экономические соображения позволяли двигаться вперед.

Итак, первым требованием к VLA была необходимость создания инструмента, способного строить изображения с максимально возможным разрешением и чувствительностью, сравнимиыми по крайней мере с теми, что дают оптические телескопы. В свете этой идеи велась параллельная разработка научных параметров и конструктивных решений системы. В качестве исходного параметра было принято разрешение $10''$ на длине волны 10 см. Это требование вместе с общими соображениями относительно эффективности и гибкости привело к существенному ограничению возможных конструктивных решений.

В течение пятидесятих годов было построено много оригинальных и мощных радиотелескопов. Сюда входят системы апертурного синтеза Райла в Кембридже, «Крест» Миллса и другие системы в Австралии, интерферометр из двух 90-футовых зеркал Болтона в Калифорнийском технологическом институте [9]. При проектировании VLA все эти конструктивные варианты были тщательно изучены. Довольно рано (в 1963 г.) было принято решение, что наиболее подходящим для планируемого телескопа является разработанный Райлом метод, при котором для заполнения апертуры используется вращение Земли (описание апертурного синтеза приведено в разд. 2.3).

Итак, в ходе предварительного рассмотрения проекта (1961—1963 гг.) были приняты три важных решения:

1. Пространственное разрешение должно иметь величину порядка $10''$ на длине волны 10 см;
2. Телескоп должен быть разносторонним инструментом, обладающим высокой эффективностью и предназначенным для использования в качестве общенационального;
3. В основу конструкции должен быть положен принцип апертурного синтеза.

В ходе своего развития телескоп VLA прошел три различные стадии: а) разработку принципиального проекта после принятия основных параметров системы, б) разработку технического проекта после проектирования необходимого оборудования, в) монтаж. Эти три стадии описаны ниже по отдельности, хотя в ряде моментов они пересекаются. Исходные параметры непосредственно определяют принципы технической реализации, однако в ряде случаев их приходилось модифицировать с учетом требований, вытекавших из конструкторских разработок.

2.1. Исходные параметры системы

Параметры системы VLA, сформулированные в ходе предварительного рассмотрения, приведены в табл. 2 и более подробно описаны ниже.

Угловое разрешение. Для выбора конкретного значения угло-

Таблица 2

Намеченные параметры системы VLA в 1967 г.

Параметр	Характеристика
Разрешающая способность	10" на длине волны 10 см
Чувствительность	0,1—1,0 мЯн
Диаграмма направленности	Подобна диаграмме параболической антенны; уровень первого бокового лепестка —20 дБ.
Поле зрения	1—10'
Угол обзора неба	От —20° до +90° по склонению
Эффективность	Время не более 12 ч для регистрации области неба при вышеуказанных значениях параметров
Поляризация	Способность измерять все параметры поляризации
Интервал частот	Не менее 3 см; несколько полос
Спектроскопия	Возможность спектроскопических исследований.
Универсальность	Максимально возможная универсальность

вого разрешения, даваемого телескопом, нет каких-либо научных обоснований. Угловые размеры изучаемых объектов заранее неизвестны. Разумеется, более высокое разрешение всегда желательно, и на ранних стадиях развития радиоастрономии движущей силой было именно стремление достичь наилучшего разрешения при создании VLA. Довольно быстро было осознано, что заданное предварительно разрешение 10" на длине волны 10 см является недостаточным. Научные требования определенно указывали на необходимость более высокого разрешения, а проектные исследования показали, что повышение разрешения вполне возможно. Окончательно было выбрано значение разрешения, равное 1" на длине волны 10 см. Представлялось, что это значение соответствует пределу технических и финансовых возможностей, и, кроме того, оно было сравнимо с разрешением, даваемым наземными оптическими телескопами. Конструкторы VLA выражали сильное желание создать телескоп, способный строить радиоизображения, которые можно было бы непосредственно сравнивать с оптическими изображениями. В результате радио- и оптические структуры изучаемого объекта можно было бы сравнивать в одном и том же масштабе.

Было также решено, что конструкция VLA не должна препятствовать возможности дальнейшего увеличения пространственного разрешения. Этого можно достичь в будущем при переходе к более коротким волнам или наращивая систему путем ввода дополнительных антенн.

Чувствительность. Чувствительность VLA ограничена шумами радиометра, различными инструментальными неустойчивостями, полосой пропускания, атмосферными эффектами, суммарной площадью антенн, временем накопления, помехами от паразитных источников, попадающих в главный лепесток диаграммы антенны («эффект путаницы»), и, возможно, другими факторами. Некоторые из этих факторов находятся под контролем инженеров-конструкторов, некоторые отражают текущий уровень развития электроники, некоторые не поддаются контролю. Хотя ясно, что главной целью является обеспечение максимальной чувствительности, также желательно, чтобы параметры системы были сбалансированы по чувствительности и стоимости. Например, было бы неразумно заплатить высокую цену за низкошумящий усилитель, а затем обнаружить, что теперь чувствительность ограничена поглощением в атмосфере или паразитными источниками. Окончательно было принято, что чувствительность должна составлять от 0,1 до 1 мЯн ($1 \text{ мЯн} = 10^{-29} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$). Это решение было принято после тщательного изучения ограничений на чувствительность; кроме того, была поставлена цель массовых измерений поляризации источников на уровне 1 % и обеспечения динамического диапазона системы для изучения структуры источников, равного 100.

Размер диаграммы направленности. На ранних стадиях проекта VLA радиоастрономы испытывали большие трудности в интерпретации положений и структуры радионисточников при наблюдениях с антеннами, имеющими сложную структуру интерференционных лепестков диаграммы направленности. Напротив, картина, полученная с помощью простого параболоида, относительно свободна от погрешностей и потому легко поддается расшифровке. В итоге исследовательская группа VLA интуитивно решила стремиться к тому, чтобы диаграмма направленности телескопа максимально приближалась к диаграмме направленности параболоида. Отсюда вытекает требование, касающееся первого бокового лепестка диаграммы, который должен иметь уровень — 20 дБ; «решетчатая» структура лепестков недопустима. Дальнейшие ограничения на размер диаграммы направленности связаны с другими соображениями. Чтобы достичь чувствительности 1 мЯн, средний квадратичный уровень боковых лепестков должен быть по крайней мере на 30 дБ ниже главного лепестка. Это необходимо для уменьшения эффекта путаницы, обусловленного паразитными источниками, попадающими в поле зрения. Чтобы свести к минимуму помехи от Солнца, далекие лепестки должны быть еще более подавлены.

Поле зрения. Желательно, чтобы поле зрения в единичном сеансе наблюдений было больше, чем размер большинства

интересующих нас источников. Это поле должно быть достаточно большим, чтобы позволить наблюдать в течение дня значительное число источников для статистических исследований. По-видимому, этим требованиям удовлетворяет поле зрения размером порядка $1-10'$.

Угол обзора неба. Почти все конструкции больших радиотелескопов основаны на компромиссе между стоимостью и возможностью обзора неба. Гораздо легче сделать телескоп с узкой полосой обзора по склонению, чем с широкой. Более того, во многих телескопах такие параметры, как выигрыш и разрешение, являются функциями склонения. Большинство существующих многоэлементных антенн работает только в полосе $\delta > 30^\circ$ и, таким образом, позволяет наблюдать менее половины всей доступной части небесной сферы. Нередко очень интересные объекты находятся вне этой полосы. Поскольку VLA был задуман как общенациональный телескоп, который предполагалось использовать астрономами США и других стран для решения самых разнообразных научных проблем, ограничения на подвижность были признаны нежелательными. В итоге было принято решение, что VLA должен быть полноповоротным телескопом без существенного изменения основных параметров в зависимости от склонения.

Эффективность. Эффективность, или скорость регистрации (speed), — это параметр, который также непосредственно связан со стоимостью. Эффективность может оказывать большое влияние на мощь инструмента и тем самым определять характер проблем, которые решаются с его помощью. Очевидно, что VLA как общенациональный телескоп должен иметь достаточно высокую эффективность. Но что под этим подразумевается?

Реализацию всех желаемых параметров, за исключением высокой эффективности, мог бы обеспечить интерферометр, состоящий из одного фиксированного и одного подвижного элементов. С таким инструментом можно построить карту изучаемой области неба за время порядка пяти месяцев, ежедневно перемещая подвижный элемент в новое положение. При этом реализуются желаемые разрешение и чувствительность. Ясно, что получение научных результатов в таких условиях требует чудовищных усилий, однако первоначальная стоимость прибора при этом сравнительно невелика. Если использовать 200 фиксированных элементов, время регистрации сократится до нескольких минут, но стоимость инструмента оказывается несоразмерно высокой. Очевидно, достаточно высокое, или, точнее сказать, разумное, значение эффективности заключено между пятью месяцами и несколькими минутами.

Как уже отмечалось выше, на ранних стадиях проектирования было решено, что для реализации желаемых параметров системы лучше всего подходит техника апертурного синтеза. Следовательно, для сбора необходимой информации необходимо некоторое число приемных антенн. Как указывалось в предыдущем разделе, можно сделать выбор между вариантами, предусматривающими либо периодическое перемещение антенн (чтобы получать новые интерферометрические пары), либо добавление к системе дополнительных зеркал. Такая схема позволяет достигнуть естественного компромисса между стоимостью и числом элементов в виде одного «дня» наблюдений (характерное время между восходом и заходом объекта). Если мы хотим сэкономить, пользуясь меньшим числом антенн, нужно организовать наблюдения так, чтобы в течение ряда дней система работала при различных конфигурациях. На практике для составления полной карты объекта при меньшем числе антенн, по-видимому, потребуется увеличить время регистрации от 12 ч до нескольких недель. Поскольку стоимость системы приблизительно пропорциональна числу антенн, а скорость сбора информации — квадрату этого числа, экономия оказывается не так уж велика, если учесть увеличение необходимого времени и соответствующую потерю эффективности. С другой стороны, увеличение числа антенн с целью достичь времени регистрации, существенно меньшего 12 ч, приводит к резкому возрастанию стоимости. Поэтому было решено принять эффективность, соответствующую длительности сеанса регистрации 12 ч.

Поляризация и частотный интервал. Единственными непосредственно наблюдаемыми параметрами любого небесного объекта являются яркость и поляризация в функции координат, частоты и времени (сказанное не относится к наблюдениям в дискретных спектральных линиях). В проекте VLA как большого радиотелескопа общенационального значения была предусмотрена возможность измерять поляризацию, а также вести наблюдения в широком интервале частот. Эти характеристики в существенной степени зависят от текущего уровня развития электроники, конструкции антенн, а также от размера ассигнований. При разработке принципиального проекта VLA эти параметры не конкретизировались.

Спектроскопия. Хотя VLA в начале шестидесятых годов рассматривался как инструмент для изучения преимущественно непрерывного спектра, его конструкторы осознавали также и важность спектральных наблюдений. Хотя спектроскопия не входила в число первоначальных целей, было решено осуществить конструкцию телескопа таким образом, чтобы не исключать возможности спектральных исследований в будущем.

Универсальность. В самом начале проектных работ было принято условие, что VLA должен быть возможно более универсальным инструментом. Например, хотя этот телескоп и не создавался специально для изучения Солнца, возможность таких исследований не отвергалась. На практике это означало, что принятие какого-либо технического решения тщательно исследовалось с точки зрения научного использования системы. Например, при расчете гетеродина для конструктора легко было выбрать какое-либо решение, удовлетворительное с чисто инженерной точки зрения. Однако иногда такое решение отвергалось, поскольку оказывалось нежелательным с точки зрения научного использования телескопа. Концепция универсальности означает, что такие параметры, как рабочий интервал длин волн, разрешение и чувствительность, должны быть достаточно гибкими, чтобы позволить решать самые разнообразные научные задачи.

Итак, конструктивные особенности телескопа VLA в значительной степени определяются набором перечисленных выше исходных параметров. Взятые в совокупности, эти параметры существенно ограничивают возможные варианты конструкции телескопа, оставляя для выбора лишь довольно малое число решений. В частности, природа инструмента четко определяется требованиями углового разрешения, угла обзора неба, размера диаграммы направленности и эффективности. Разрешение в 1" на длине волны 10 см требует размера порядка 35 км. Телескоп такого диаметра построить невозможно. Это означает, что нужно использовать многоэлементную систему той или иной конструкции. Условие полного покрытия неба требует двумерной конструкции антенн. Невозможно получить хорошую симметричную диаграмму направленности с набором антенн, расположенных вдоль одной линии. Требования, обусловленные выбором характеристик разрешения, диаграммы направленности, угла обзора неба и многофункциональности совместно определяют возможную конфигурацию элементов. Эффективность (скорость регистрации) и размер диаграммы направленности определяют число антенн.

Указанный набор исходных параметров не следует рассматривать как принятый единогласно. Эти параметры служили предметом ожесточенных дискуссий, продолжавшихся как внутри, так и вне НРАО в течение нескольких лет вплоть до начала проектных работ. Дискуссии, в которых приняли участие многие радиоастрономы, оказались весьма полезными. На ранних стадиях обсуждения они помогли сформулировать требования к основным параметрам системы. После того как исходные

параметры были установлены, эти дискуссии позволили в той или иной степени уточнить научную программу.

Многие специалисты утверждали, что полноповоротность телескопа не является необходимой или что требования, касающиеся направленности, являются слишком жесткими. Эти аргументы имели целью уменьшение стоимости инструмента, но ценой потери ряда преимуществ. Однако к тому времени был уже достигнут разумный баланс между научными параметрами, конструктивными решениями и стоимостью системы. Например, уменьшение угла обзора неба изменило бы другие характеристики системы, и эта потеря не компенсировала бы некоторое уменьшение стоимости. Единственным исключением являлось угловое разрешение. Можно уменьшить размеры системы без существенного ухудшения всех параметров, кроме разрешения, и при этом получать большой выигрыш в стоимости. Эта проблема оставалась открытой до самого конца проектирования, пока не выяснилось, что в дальнейшей экономии уже нет необходимости.

Другим возможным средством экономии является уменьшение полосы пропускания приемника или уменьшение числа частотных каналов. Эти вопросы также оставались открытыми. Во всех подобных случаях было решено оставить возможность отказаться в будущем от ограничений, вводимых на ранних стадиях проектирования. Модификация или уменьшение масштаба проекта, которые существенно ухудшили бы возможности инструмента, были признаны нежелательными.

Те же соображения использовались и в ходе строительства телескопа. Однако ввиду большой и непредвиденной инфляции (см. разд. 4) пришлось сократить размеры всей программы. При этом специалисты старались вводить такие ограничения, которые можно было бы снять в будущем.

Один из основных «параметров» все же должен быть более или менее фиксирован. Невозможно приступить к проектированию такого большого инструмента, как VLA, без хотя бы грубой оценки размера ассигнований. В 1964 г. была довольно произвольно выбрана сумма в 40 млн. долл. Эта же цифра была упомянута в сообщении «комитета Уитфорда» в связи с рекомендациями создания многоэлементной системы высокого разрешения. Проектирование началось с учетом этой суммы.

2.2. Принципиальный проект

Принципиальный проект телескопа во многом определяется принятой системой исходных параметров. При его разработке проводятся исследования, связанные с выбором места, конфигурацией антенн, числом антенн и их размерами, расчетом атмо-

сферных эффектов и проектированием металлоконструкций. Для натуральных испытаний на обсерватории Грин-Бэнк был построен специальный интерферометр. Все эти исследования кратко описаны ниже.

Выбор места. Требования к размещению телескопа определяются его природой и особенностями многоэлементной системы. Требуется площадка размером по крайней мере 35 км. Для удобства расположения и перемещения отдельных антенн площадка должна быть довольно плоской. Желательно, чтобы искомая площадь была расположена на низких широтах, так как характеристики системы зависят от широты, а также на большой высоте над уровнем моря, где помехи атмосферы минимальны. Следует держаться вдали от больших населенных пунктов, промышленных центров, горных разработок и других центров промышленной деятельности, которые являются источниками электромагнитных помех при наблюдениях. Площадь не должна быть заселена или освоена, чтобы цена была не слишком высокой. Наконец, место должно быть легко доступным для приезжих и достаточно привлекательным для проживания постоянного штата специалистов и обслуживающего персонала.

Таким образом, внимание было сконцентрировано на поисках большой, плоской, неосвоенной и легко доступной местности в юго-западных районах США. После предварительных просмотров топографических карт было выявлено 34 площадки, потенциально удовлетворяющих этим критериям. Некоторые из них оказались покрытыми вулканической лавой, другие либо были связаны с нефтяными месторождениями, либо служили полигонами военно-воздушных сил США, используемыми для бомбометания, либо были отвергнуты по другим причинам. Из семи оставшихся площадок, одна, а именно плато Сан-Агустин, явно выделялась среди остальных.

Плато Сан-Агустин находится в штате Нью-Мексико, в 90 милях от Альбукерке. Десять тысяч лет назад на месте площадки располагалось озеро. В наши дни это плоская равнина, поросшая травой и используемая как пастбище. Область мало населена и не является источником минеральных ресурсов. Бесплодная и высокая (2135 м над уровнем моря), эта площадка является почти идеальным местом для размещения большой многоэлементной радиоастрономической системы.

Для системы VLA был закуплен участок в одну квадратную милю в центре площадки и, кроме того, арендовано три узких полосы шириной 180 м и длиной 21 км. Установка антенн заметно изменила вид местности, но использование земли практически не изменилось. Скот пасется, как и прежде. Некоторые

владельцы ранчо возражали-против строительства VLA из эстетических соображений или из принципа, однако большинство местных жителей относятся к астрономам дружелюбно и радушно.

Конфигурация и число антенн. С помощью ЭВМ были рассчитаны различные характеристики системы в широком диапазоне склонений от -20° до $+90^\circ$ с фиксированным временем накопления 8 ч и по возможности малым числом антенн. Была учтена возможность расширения системы за счет подключения дополнительных элементов к основной конфигурации. Исследовалось несколько возможных конфигураций, таких, как круговая, крестообразная, случайная, Т-образная и Y-образная. Круговая и случайная конфигурации как не имеющие перспективы роста в будущем были отброшены. Из оставшихся наилучшей оказалась конфигурация в виде трехлучевой равноугольной звезды (Y-образная), состоящая из трех лучей под углами 120° . Один луч смещен относительно направления на север на 5° . Для достижения желаемого разрешения длина каждого луча должна составлять 21 км.

Для построения полной карты объекта за 8 ч требуется 36 антенн, по 12 на каждом луче. Поскольку четкий критерий определения «наилучшего» расположения антенн отсутствует, точная фиксация антенн на лучах не имеет решающего значения. При расположении антенн были использованы результаты расчетов Чау [8] с целью оптимизации параметров системы и уменьшения числа подвижек антенн. Всего предусмотрено четыре различных конфигурации.

После завершения проектирования системы антенн, но до утверждения проекта намеченный уровень боковых лепестков диаграммы направленности был изменен с -20 до -16 дБ. Необходимость такого изменения стала ясной после расчетов уровня боковых лепестков диаграммы направленности в функции числа антенн. Оказалось, что для создания уровня -16 дБ требуется всего 27 антенн. Подавление вторичных лепестков на более низком уровне требует введения в строй значительно большего числа антенн; меньшее подавление мало меняет параметры системы. Таким образом, 27 антенн и уровень -16 дБ обеспечивают, по-видимому, наилучший компромисс между характеристиками и стоимостью системы. Дополнительное подавление до уровня -20 дБ оказывается слишком дорогим.

Размеры антенн. Чувствительность VLA определяется целым рядом факторов, большинство из которых связано с дополнительными соображениями. Например, чувствительность пропорциональна числу элементов системы. Однако, как уже отмечалось, это число определяется требуемой конфигурацией антенн,

синтезирующих изображение. Единственным более или менее «свободным» параметром является площадь индивидуальной антенны. Чувствительность системы пропорциональна квадрату диаметра антенн. К сожалению, стоимость антенн примерно пропорциональна кубу диаметра. Здесь мы снова встречаемся с необходимостью компромисса между размерами и стоимостью. Правда, имеются дополнительные соображения. Характер диаграммы направленности индивидуальной антенны определяется наличием нежелательных вторичных лепестков, с одной стороны, и размерами поля зрения — с другой. У слишком малых антенн трудно подавить побочные лепестки. Слишком большая антенна может иметь малое поле зрения. Кроме того, отдельные антенны должны быть достаточно велики для проведения калибровочных измерений независимо от системы в целом.

Все эти соображения не позволяют получить точный ответ на вопрос о размерах антенны, определяя довольно широкий интервал возможных значений диаметров. При проектировании был выбран диаметр 25 м, как наибольший из соответствующих рамках бюджета. Кроме того, ряд групп в США уже имел опыт работы с антеннами такого диаметра, и этот опыт при строительстве VLA мог оказаться полезным.

Атмосферные эффекты. Атмосферные эффекты, как было выяснено, могут быть одним из главных факторов, ограничивающих мощь телескопа VLA. К сожалению, в шестидесятые годы о величине этих эффектов было известно довольно мало. В обращении с когерентными сигналами, проходящими через атмосферу на масштабах, сравнимых с размерами системы VLA, не было опыта. Никто в мире не строил до этого радиокарты с разрешением $1''$. Для исследования возможных атмосферных эффектов пришлось предпринять ряд специальных программ. При измерении флуктуаций фазы сигнала при прохождении через атмосферу в функции расстояния между антеннами был использован интерферометр обсерватории Грин-Бэнк. Для проверки возможности построения изображений на расстояниях и длинах волн, сравнимых с проектируемыми для VLA, к интерферометру был добавлен четвертый элемент на расстоянии 35 км. Были также сделаны попытки выявить корреляции фазовых ошибок интерферометра с содержанием в атмосфере водяного пара, имея в виду перспективы развития в будущем активных (адаптивных) систем.

Эти исследования показали, что разрешение, равное $1''$, является реально достижимым. Кроме того, была получена качественная оценка величины атмосферных эффектов. После дополнительного теоретического рассмотрения оказалось возможным принять допустимую инструментальную фазовую

ошибку, равную 1° на 1 ГГц действующей частоты. Таким образом, на частоте 5 ГГц была признана допустимой ошибка в 5° . На этом уровне фазовые ошибки, вызванные инструментальными и атмосферными причинами, оказываются сравнимыми.

Электроника и металлоконструкции. Как только началось проектирование VLA, стало ясным, что наибольшие трудности встречаются при расчете двух элементов электронной системы, обеспечивающих а) поддержание стабильности фазы и когерентности сигнала на больших расстояниях и б) прохождение сигнала через систему. Проектирование этих элементов началось довольно рано. Были найдены разумные решения, которые были рассчитаны, детализированы, проверены и оценены в отношении стоимости даже прежде, чем было открыто финансирование проекта в целом. В дальнейшем были получены новые и более эффективные решения, в частности в отношении распространения сигналов, так что первоначальные разработки использовать не пришлось. Однако они оказались полезными для оценки возможностей, а также и стоимости VLA.

Для проектирования антенн и системы их подвижек удалось использовать достаточно простые инженерные расчеты. Здесь не было особенно большого риска. Однако, поскольку на металлоконструкции приходится значительная часть общей стоимости VLA, им было уделено много внимания, главным образом с целью найти наиболее экономичное решение.

Интерферометр обсерватории Грин-Бэнк. Для создания интерферометра с переменной базой к существующей антенне диаметром 26 м была добавлена вторая подвижная 26-м антенна. В 1966 г. были добавлены третья 26-м антенна и четвертая портативная, которая передвигалась на расстояние до 35 км. Этот интерферометр был создан с двумя целями: в качестве модели будущей системы VLA и как мощный научный инструмент. С его помощью был решен ряд задач проекта VLA.

Антенны системы VLA должны быть подвижными по причинам, описанным ниже. Как правило, подвижные антенны перемещаются по рельсам. В качестве возможного альтернативного решения антенны интерферометра перемещались с помощью специальной тележки на резиновых колесах. Было также построено шоссе, по которому можно было перевозить антенны от одного положения к другому. После нескольких лет его эксплуатации было решено вернуться к рельсовому варианту.

Интерферометр обсерватории Грин-Бэнк нашел применение для отладки многих электронных систем, которые впоследствии были использованы для VLA (или же отвергнуты). Он использовался для построения пробных карт с разрешением $1''$, а также для исследования атмосферных эффектов. На нем были раз-

работаны и проверялись системы обработки данных и техника апертурного синтеза. Наконец, и это, вероятно, самое важное, интерферометр дал ученым и инженерам непосредственный опыт расчета, отладки и использования многих элементов техники и оборудования, которые впоследствии были включены в систему VLA.

Все эти разработки привели к окончательному набору параметров, характеризующих систему VLA. Главные из них приведены в табл. 3.

Таблица 3

Принципиальные проектные характеристики системы VLA

Инструмент, строящий изображения с помощью апертурного синтеза 27 антенн диаметром 25 м
Расположение антенн в виде трехлучевой звезды, длина луча 21 км
Перемещение антенн вдоль лучей по рельсовым путям
Четыре возможных конфигурации антенн с различным разрешением
Четыре спектральные полосы
Измерение четырех параметров поляризации
Возможность измерений в спектральных линиях
Полноповоротная конструкция антенн

Итак, согласно проекту VLA, — это многоэлементная система из 27 антенн, каждая диаметром 25 м. Антенны располагаются в виде трехлучевой звезды с лучами длиной 21 км. Каждая антенна связана со всеми остальными, при этом учитывается время задержки, что дает 351 интерферометрическую пару. Накопление сигналов от 351 интерферометра позволяет построить карту неба за время от 8 до 12 ч. В конце периода наблюдений накопленные данные трансформируются в карту исследуемой области путем применения обратного преобразования Фурье.

Антенны движутся по рельсовым путям вдоль лучей системы, а для наблюдений устанавливаются на специальных бетонных основаниях. Можно реализовать четыре набора положений антенн, что дает четыре различных конфигурации многоэлементной системы. При этом разрешение меняется примерно в три раза; соответственно меняются чувствительность и другие параметры.

Наблюдения можно проводить в четырех спектральных диапазонах. Их смена легко осуществляется под контролем ЭВМ. Одновременно измеряются все четыре параметра поляризованного излучения. Для спектральных наблюдений доступны несколько сотен частотных каналов с различным разрешением по частоте.

Первоначальным проектом системы VLA предусматривалось 36 элементов с рабочей длиной волны 11 см и предполагалось

добавить дополнительно в будущем также длины волн 21 и 3 см. Сокращение числа антенн от 36 до 27 было уже описано выше. За время около шести лет, прошедшее после завершения первоначального проекта и до начала монтажа, произошли некоторые события, отразившиеся на проекте. Во-первых, был запущен радиоастрономический спутник ATS с мощным передатчиком на волне 11 см. Поскольку VLA был задуман для работы в широком спектральном интервале, было решено сместить рабочую длину волны до 6 см. Далее изобретения в области конструирования антенн и электроники сделали возможной многополосную систему регистрации. Сюда входят приемная система на четырех частотах, система распространения сигнала по волноводам, вращающееся вторичное кассегреновское зеркало антенны, позволяющее легко переходить от одного спектрального интервала к другому, а также развитие конструкции главного зеркала и системы наведения антенн, обеспечивающих возможность надежной работы на коротких длинах волн. Более подробно все эти усовершенствования описаны в разд. 3.

Обсуждения и расчеты параметров и конструкции VLA, описанные в этом и следующем разделах, относятся к 1964—1969 гг. Проектная группа VLA была официально учреждена летом 1964 г. во главе с Дж. У. Свенсоном. Туда входили Б. Дж. Кларк, Д. С. Хишен, Д. Е. Хогг, Г. Хватум, У. К. Тайлер, К. М. Уэйд и С. Уэйнреб. Группа собиралась на совещания один раз в месяц на протяжении пяти лет. Участие в проектировании принимали также многие коллеги из НРАО и других обсерваторий.

Проектная группа не имела такой жесткой организационной структуры, как, скажем, созданная позже группа, обеспечивающая реализацию проекта. Тем не менее имелось некоторое разграничение функций: выбор места — Уэйд и Свенсон, конфигурация антенн — Хогг, размеры системы и чувствительность антенн — Уэйд, электроника — Тайлер и Уэйнреб, антенны — Хватум, обработка данных и ЭВМ — Кларк.

2.3. Апертурный синтез

Этим термином обозначается совокупность различных технических приемов, при которых наблюдения ведутся с двумя или более малыми антеннами, призванными заменить единичную антенну большой апертуры. Основная идея метода возникла еще на заре развития радиоастрономии [21], но техника апертурного синтеза в современной форме была впервые описана Райлом и Хьюишем [33]. Здесь мы приведем только краткое качественное изложение метода апертурного синтеза, использованного в VLA (более детальное описание см. в [12]).

Если скомбинировать вместе сигналы от двух антенн, результатом будет один компонент фурье-преобразования распределения яркости в той области неба, куда направлены антенны. Отдельный компонент разложения определяется разделением антенн d и их относительной ориентацией θ . После измерения в точке (d_1, θ_1) можно передвинуть вторую антенну на новое место (d_2, θ_2) и измерить второй фурье-компонент разложения. Последовательно перемещая антенну, можно измерить большое число фурье-компонентов. После достаточного числа измерений можно построить радиокарту исследуемой области, применяя обратное преобразование Фурье.

Область неба размером $100''$ при разрешении $1''$ требует измерения не менее 10^4 фурье-компонентов. Согласно этой схеме, необходимо не менее 10^4 перемещений антенны, что, разумеется, нереально. Для ускорения процесса имеются два пути. Можно просто добавлять новые антенны. Число фурье-компонентов, регистрируемых одновременно системой с n антеннами, составляет $n(n-1)/2$. Таким образом, 10 антенн работают в 45 раз быстрее, чем две, а 27 антенн — быстрее в 351 раз. Второй путь состоит в использовании того факта, что по отношению к небесному объекту ориентация пары антенн меняется из-за вращения Земли. Следовательно, если данный объект сопровождать от восхода до заката, с фиксированной парой антенн можно измерить большое число фурье-компонентов.

В системе VLA использованы оба этих приема. Двадцать семь антенн образуют 351 интерферометрическую пару, которые могут следить за источником в течение 8—12 ч и измерять свыше 10^5 фурье-компонентов в распределении яркости изучаемого объекта. Обратное преобразование Фурье дает возможность построить карту объекта с высоким разрешением и чувствительностью, сравнимыми с теми, что дают антенны существенно больших размеров, нежели индивидуальные антенны VLA.

3. Проектирование систем VLA

В этом разделе будут рассмотрены некоторые общие соображения, касающиеся проектирования систем VLA. Более подробные сведения можно найти в работах [24, 25, 38] и приведенных там ссылках.

Детальное проектирование VLA осуществлялось по четырем основным направлениям: 1) расположение и конфигурация системы антенн, 2) антенны и облучатели, 3) электроника, 4) компьютеры. Для того чтобы четко разграничить области ответственности, такое деление использовалось как на стадии проектирования, так и на стадии монтажа. «Стыковка» этих

отдельных участков, как оказалось, вызывала не больше затруднений, чем обеспечение согласования элементов внутри каждой области.

3.1. Антенны и облучатели

Проектом VLA предусмотрены антенны диаметром 25 м. Для наблюдений на длинах волн короче 1 см поверхность антенн должна быть изготовлена с высокой степенью точности. При проектировании антенн для длины волны 3 см уже был накоплен известный опыт и можно было полагать, что переход к волне 1 см не вызовет особых затруднений, если не считать проблемы наведения. Эти предложения оправдались. Однако заказ 28 антенн (27 рабочих и одна запасная) оказался удобным случаем для того, чтобы добиться снижения стоимости всей конструкции, и это обстоятельство следовало предусмотреть в проекте.

Проектная группа НРАО во главе с У. Дж. Хорном разработала проект, на основе которого позже установлены технические задания для контракта на изготовление. Этот проект был также использован при обсуждении и выборе решений, предлагаемых различными подрядчиками. С целью ускорения контракты были размещены между несколькими фирмами. В качестве окончательного варианта была принята альтазимутальная монтажировка полноповоротной касегреновской антенны. Для повышения эффективности касегреновской системы форма главного зеркала слегка уклоняется от параболической. Вторичное зеркало является асимметричным гиперболоидом. Асимметрия приводит к небольшому смещению фокуса от геометрической оси главного зеркала. Из-за вращения вторичного зеркала вокруг своей оси фокальная точка описывает окружность в плоскости, перпендикулярной оси главного зеркала. Можно легко менять рабочую частоту, если расположить облучатели по этой окружности и поворачивать вторичное зеркало. Общий вид нескольких антенн системы VLA показан на рис. 2а. На рис. 2б приведены главные элементы антенны.

Антенны рассчитаны на работу с сохранением заданной точности при ветрах, достигающих скорости 27 км/ч. При скорости 70 км/ч точность (главным образом при наведении) слегка понижается. Антенны могут выдержать ветер скоростью 230 км/ч, даже будучи покрыты слоем льда толщиной 1 см или при снеговой нагрузке 100 кг/м². Последние условия встречаются редко. Однако ветры на этой площадке дуют довольно часто, и в отдельных случаях регистрировался ветер до 160 км/ч.

В ходе проектирования антенн уделялось значительное внимание соотношениям между требованиями, определяющими

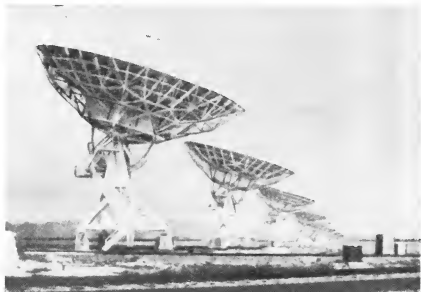
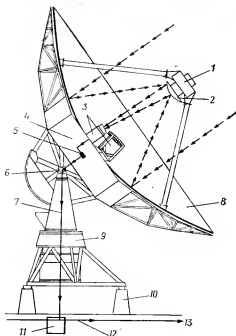


Рис. 2а. Общий вид антенн, расположенных вдоль восточного луча системы.

Рис. 2б. Схема конструкции антенны. Указаны главные элементы. Стрелками показано направление распространения лучей от источника к центральному пульту. 1—фокус параболоида; 2—асимметричное вторичное зеркало; 3—облучатели; 4—помещение для аппаратуры; 5—приемная электроника; 6—подшипник оси высот; 7—20-мм волновод; 8—поверхность главного зеркала; 9—азимутальный подшипник; 10—фундамент; 11—соединительный колодец; 12—подземный 60-мм волновод; 13—сигнал на центральный пульт.



научные задачи, структурными и механическими параметрами и стоимостью. Например, из специфики многоэлементной системы вытекает требование о том, чтобы фазовые центры антенн были фиксированы и не изменяли своего расположения при различной ориентации антенн. Помимо прочего это требование означает, что две оси антенны должны пересекаться. Чрезмерно жесткое соблюдение этого условия может привести к тому, что фирма-изготовитель будет уделять слишком много внимания точности изготовления, юстировки и контроля, что в свою очередь недопустимо поднимет цену.

Компромиссы подобного рода, приводящие к необходимости согласования научных параметров, инженерных и конструкторских требований, условий изготовления и стоимости, встречались при проектировании практически всех систем VLA. Впрочем, такая ситуация типична для любого крупного научного проекта. В случае VLA затруднения разрешались таким образом, что все аспекты создания телескопа систематически обсуждались совместно группой экспертов, включающей радиоастрономов, инженеров и представителей фирм. Эти обсуждения носили обязательный характер независимо от того, насколько необходимыми и полезными они представлялись отдельным специалистам.

Антенны спроектированы таким образом, что их можно поднимать и перемещать специальным транспортером (см. описание в следующем разделе). Когда антенна находится в режиме наблюдений, она прикрепляется к специальному фундаменту на трех опорах.

Каждая антенна снабжена рупорными облучателями, рассчитанными на работу в четырех спектральных диапазонах. Облучатели имеют двойной вывод для измерения или линейной, или круговой поляризации. Создание облучателей, особенно на длинах волн 18—21 см, оказалось одной из самых сложных проблем [14, 39]. Этот облучатель представляет собой гофрированную конструкцию с гибридными линзами из диэлектрических проводящих элементов. Облучатель для волны 6 см имеет гофрированный рупор с диэлектрическими линзами, тогда как для волн длиной 2 и 1,3 см использованы мультиволновые рупорные облучатели.

Проектом предусмотрена система, обеспечивающая одновременную регистрацию излучения в диапазонах 6 и 2 см. Она включает в себя небольшой рефлектор (смонтированный на облучателе), который прозрачен для излучения с длиной волны 2 см, но отражает 6-см излучение на другой рефлектор, который в свою очередь отражает его на соответствующий облучатель. В таком режиме слегка увеличивается антенная температура и уменьшается эффективная апертура, но система такого

рода весьма полезна для целого ряда задач. Правда, из-за инфляции эта система еще не введена в строй. Ввиду ее значительной стоимости было принято не считать ее первоочередной по сравнению с другими системами VLA.

3.2. Конфигурация системы антенн

Подвижность антенн сразу дает несколько преимуществ: а) обеспечивает значительную гибкость при различных конфигурациях и, следовательно, позволяет реализовать различные характеристики системы в зависимости от научной проблематики; б) дает возможность производить сборку антенн в одном и том же месте, что существенно удешевляет монтаж; в) позволяет перевозить антенны в специальный ангар для ремонта и профилактики по заранее запланированному графику.

На рис. 3 показана центральная часть системы рельсовых путей для перемещения антенн VLA. Два стандартных рельса с шириной колеи 5,5 м простираются вдоль каждого луча. Имеются также рельсы, направленные перпендикулярно основному пути, которые позволяют перемещать антенны на расстояние до 30 м от осевой линии для наблюдений. В общем тре-

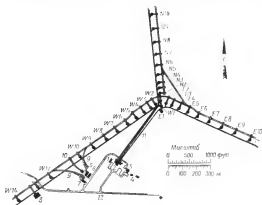


Рис. 3. Центральная часть системы VLA. Показаны рельсовые пути, места расположения антенн (обозначены черными кружками), волноводы и здания [38]. На каждом луче имеется по 24 фундамента для антенн. В наиболее компактной конфигурации антенны занимают 27 внутренних пунктов. В наименее компактной конфигурации заняты только указанные на рисунке пункты E8, N8 и W8, а все другие антенны располагаются за пределами участка, показанного на рисунке. 1 — лабораторный корпус; 2 — центральный пульт управления; 3 — кафетерий; 4 — гостиница; 5 — ремонтный цех и вспомогательный генератор; 6 — склад; 7 — здание техобслуживания; 8 — ангар для монтажа антенн; 9 — подземные пути; 10 — ремонтная площадка; 11 — волновод; 12 — старое шоссе.

буется около 130 км рельсов. С целью уменьшения стоимости характеристики рельсов и других материалов выбирались максимально близкими к стандартным, используемым на железных дорогах. Поскольку вес и скорость перемещения антенн невелики, проектирование рельсовых путей не вызывало особых затруднений и основные усилия были направлены на обеспечение экономики при их строительстве и эксплуатации.

Для перемещения антенн применяется специально сконструированный транспортер. Он снабжен четырьмя шестиколесными тележками по две на каждый рельс. Гидравлическая система обеспечивает возможность подъема, опускания и поворота антенн на 90° . Это позволяет транспортеру поднимать антенну с фундамента и переносить под прямым углом с вспомогательного рельсового пути на главный. Транспортер приводится в движение дизельным двигателем. Дизель-генератор обеспечивает питание электронной системы во время перемещения антенны. Транспортер весит 90 т и может передвигать 215-т антенну со скоростью 8 км/ч. При наличии двух транспортеров изменение конфигурации системы антенн в зависимости от требуемого их положения может занимать от полутора до пяти дней. В ходе процесса изменения конфигурации из наблюдений исключается лишь небольшое число антенн.

3.3. Приемная система

Упрощенная блок-схема приемной системы показана на рис. 4. В основном это обычное интерферометрическое устройство с немногими добавлениями, характерными для VLA. Сигнал от антенны, усиленный на входе, преобразуется в промежуточную частоту, модулируется несущей частотой и передается на центральный контрольный пульт. Здесь сигнал демодулируется, снова усиливается, подвергается цифровому преобразованию и проходит через систему задержки, которая компенсирует различие длин путей в атмосфере и при передаче от различных антенн. Затем такой сигнал расщепляется на 26 компонентов и осуществляется корреляция с сигналами от всех других антенн.

Большинство особенностей и специфических проблем VLA связано с большими расстояниями и большим числом элементов системы. Вносит свои сложности и наличие нескольких рабочих частот и широких спектральных интервалов. Часть проблем, например проблема распространения сигнала и устойчивости фазы, являются общими для всех интерферометров, но в данном случае они существенно усложняются наличием 351 элемента при длине плеча 21 км.

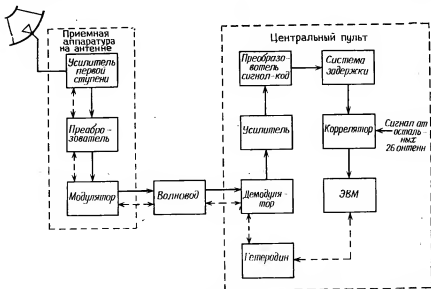


Рис. 4. Упрощенная блок-схема приемной системы с указанием основных элементов.

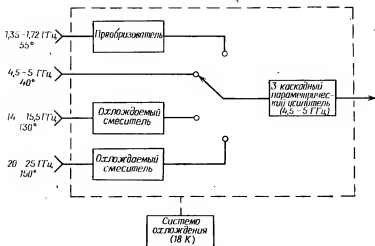


Рис. 5. Блок-схема первой ступени приемника.

Многочастотный приемный тракт на входе был изготовлен первоначально для 43-метрового радиотелескопа НРАО. Как показано на рис. 5, аналогичный тракт VLA состоит из следующих элементов: параметрического усилителя, который используется в качестве первого каскада системы усиления на 6 см; преобразователя на 18—21 см, который связан со вторым каскадом параметрического усилителя на 6 см; смесителей на 2 и 1,3 см, которые также связаны со вторым каскадом параметрика на 6 см. Два набора перечисленных элементов вместе с переключателями и соответствующим калибровочным устройством смонтированы в одном охлаждаемом боксе, в котором поддерживается температура 18 К. Бокс расположен в специальном помещении непосредственно под главным зеркалом антенны. Два независимых канала позволяют регистрировать сигналы с двух выходов облучателя для измерения параметров поляризации. Например, комбинация правостороннего R и левостороннего L компонентов круговой поляризации от двух антенн дает четыре комбинации RR, LL, RL, LR, которые в свою очередь определяют четыре параметра поляризации приходящего излучения.

Используя ЭВМ, можно выбрать любой из четырех доступных спектральных диапазонов: 18—21, 6 и 1,3 см. Переход от одного диапазона к другому занимает не более нескольких секунд и осуществляется, как уже отмечалось, поворотом второго зеркала.

Охлаждаемое четырехчастотное устройство на входе приемной системы является хорошим примером сложных компромиссов, к которым приходилось прибегать при проектировании такого уникального инструмента, как VLA. Во-первых, охлаждение на входе усилителя и преобразователя частоты приводит к высокой чувствительности, что является большим преимуществом VLA. Однако охлаждаемая система стоит дороже обычной и сложнее в эксплуатации. Криогенная система сама по себе причиняет немало беспокойства. Во-вторых, размещение в одном месте устройства для приема одновременно четырех спектральных каналов обеспечивает гибкость и разносторонность VLA и, вероятно, позволяет сэкономить средства при изготовлении телескопа. Однако содержимое охлаждаемого контейнера становится слишком сложным. В случае повреждения необходимо демонтировать для замены целый блок. Это повышает требования к надежности и усложняет монтаж. Имеются свои проблемы в системе охлаждения, связанные с поддержанием постоянной температуры, доступностью при ремонте и т. д. В-третьих, требования высокой чувствительности и высокой надежности редко уживаются вместе. Обычно для повышения надежности приходится жертвовать чувствительностью. Наконец,

высокая чувствительность в сочетании с высокой надежностью вместе стоят довольно дорого. В телескопе VLA каналы 18—21 и 6 см, по-видимому, близки к пределу чувствительности. Каналы 2 и 1,3 см примерно в пять раз менее чувствительны по сравнению с пределом. В этих случаях требования снижены с учетом надежности и стоимости.

Гармонические сигналы от гетеродина на нескольких частотах подаются на каждую антенну для использования в смесителе и параметрическом усилителе. Эти сигналы должны быть синхронизованы по фазе, причем стабильность фазы должна быть не хуже 1° на 1 ГГц рабочей частоты за время порядка нескольких часов. Более долговременные уходы фазы можно исключить при периодических наблюдениях калибровочных источников. Все сигналы гетеродина генерируются специальным устройством на центральном пульте. Эти сигналы преобразованы в дискретный код, так что, например, для спектральных наблюдений в полосе 50 МГц эту полосу можно локализовать в любом месте диапазона системы приемник-облучатель. Сигналы гетеродина передаются на антенны при помощи системы волноводов, описанной в следующем разделе, а затем возвращаются, опять по волноводам, обратно на центральный пульт. Смещения фазы, возникающие при таком путешествии, тщательно измеряются и затем вносятся в виде поправок в измеряемые фурье-компоненты.

Такие параметры гетеродина, как устойчивость, когерентность, чистота и надежность, являются критическими для эффективной работы всей системы. Расчет гетеродина рассматривался как одна из самых сложных проблем при проектировании электроники VLA. Были разработаны две различные системы, и после испытаний была принята одна из них.

Другим сложным и важным компонентом VLA является система передачи сигналов. В ней предусматриваются три типа сигналов: а) сигналы гетеродина, посылаемые из центрального пульта на каждую антенну и возвращающиеся, как уже описывалось, обратно; б) четыре сигнала промежуточной частоты (IF), каждый в полосе шириной 50 МГц, подаваемых на выход приемника, которые затем направляются от каждой антенны на центральный пульт, и в) следящие и контрольные сигналы, которые передаются между антеннами и пультом. Для системы из 27 антенн, простирающейся на 21 км, проблема передачи сигналов становится весьма существенной.

В первоначальном проекте шестидесятых годов для передачи сигналов предполагалось использовать подземные кабели диаметром 22 и 41 мм. Рассматривалась также возможность прямой микроволновой передачи, но она была отвергнута ввиду интерференции сигналов около центра многоэлементной сп-

стемы. Можно было бы рассмотреть оптические передаточные системы, но они в те годы были недостаточно развиты. Кроме того, они не удовлетворяли требованию сохранения фазы гетеродина на прямом и обратном пути. Другими словами, чтобы присписать половину фазовой ошибки обратному пути, ошибка на прямом пути должна быть такой же. Этого нельзя достичь с оптическими системами, поскольку оптический модулятор нельзя использовать как демодулятор. Микроволновой же смеситель может быть одновременно и модулятором, и демодулятором.

Можно было применить кабельную коаксиальную связь, но она громоздка и ограничена по целому ряду параметров. К счастью, в начале семидесятых годов американские и японские телефонные компании разработали подходящие системы связи. Это круглые волноводы, использующие моду TE_{01} (или H_{01}). Отметим, что эта гармоника, в течение десятилетий представлявшая чисто научный интерес, имеет затухание всего 1 дБ на пути 1 км в полосе 30 ГГц при распространении в волноводе диаметром 60 мм. Для сравнения укажем, что в линии коаксиальной кабельной связи диаметром 41 мм потери составляют 30 дБ на 1 км в полосе 2 ГГц.

Система, окончательно принятая для VLA, состоит из 60-миллиметровых волноводов, расположенных вдоль каждого из трех лучей. Эти волноводы переносят между антеннами и центральным пультом сигналы гетеродина, сигналы промежуточной частоты, следящие и контрольные сигналы. Переносимые сигналы модулируются на несущей полосе частот в диапазоне 27—53 ГГц. Каждой антенне на луче выделена своя полоса шириной 2,4 ГГц. Специальное устройство на каждой антенне отражает сигнал в волновод. Максимальное затухание сигнала на пути от приемника антенны до центрального пульта не превышает 56 дБ. Система не требует дополнительных усилителей. В ней соблюдаются требования совпадения ошибок фазы гетеродина на прямом и обратном пути. Для обеспечения лучшего температурного режима, а также стабильности фазы сигналов гетеродина волноводы погружены под землю на глубину не менее одного метра. С целью уменьшения эффектов поглощения атмосферным кислородом и предохранения внутренних поверхностей от коррозии в волноводы закачан азот. Для предупреждения внешней коррозии применяется пластиковое покрытие, а также катодная защита.

Система передачи сигналов является хорошим примером того, как VLA реагирует на постоянно изменяющийся уровень развития технологии. Технология развивается быстро, и, если бы проектирование VLA осуществлялось в наши дни, вместо круглых волноводов для передачи сигналов можно было бы

использовать другую технику. Другими примерами использования достижений технологии в VLA являются электроника и вычислительная система. Однако использование современной технологии сопряжено с некоторым риском. Увлечение новой, неапробованной техникой в сложных системах, если ожидания не оправдаются, может привести к убыткам. Следовательно, необходимо тщательно взвешивать риск и возможный выигрыш. Эти два фактора должны быть, хотя бы грубо, сбалансированы. Кроме того, возникает искушение постоянно пересматривать проекты с учетом достижений технологии. Это может задержать изготовление. На некоторой стадии, если вы хотите, чтобы инструмент был бы построен точно по графику с соблюдением сметы, нужно просто «заморозить» дальнейшие разработки.

Другими элементами телескопа VLA, которые претерпели значительные изменения за период между начальной и конечной стадиями проектирования, являются линия задержки и коррелятор. Плоская волна, приходящая от источника, попадает на различные антенны системы в различное время в зависимости от расположения антенн и места испускания исходного сигнала. Кроме того, нужно учитывать различия во времени прихода сигнала от индивидуальных антенн на центральный пульт. Для компенсации всех этих различий приходится вводить соответствующие времена задержки. Тогда сигналы приходят в общую точку с одной и той же фазой. Максимальное время задержки составляет 140 мкс. Время задержки должно быть различным для разных антенн, и его точность должна составлять около 2 нс.

С помощью интерферометра обсерватории Грин-Бэнк было рассчитано и испытано несколько вариантов линии задержки. Неплохие результаты показала гибридная система из кабеля, состоящего из отрезков постоянной длины, и акустических элементов. Обнадеживающими были также испытания чисто акустической системы. Однако и здесь, как и в других случаях, некоторая задержка реализации проекта в конце шестидесятых годов оказалась счастливой. Быстро развивались цифровая техника и электронные схемы, а их стоимость резко падала. В начале семидесятых годов стала доступной сравнительно недорогая система цифровой задержки, которая и была принята.

В окончательном проекте сигналы от каждой антенны, достигнув центрального пункта, преобразуются в цифровой код, проходят через систему задержки, расщепляются на 26 компонентов и подвергаются корреляции с сигналами от остальных 26 антенн. Для наблюдений в непрерывном спектре используется кросс-корреляция с нулевым временем задержки. Для спектральных наблюдений корреляции получают с соответствующими сдвигами по времени; затем для получения окончательной

корреляции в функции частоты используется преобразование Фурье.

Заслуживают внимания еще два интересных обстоятельства, связанных с системами задержки и корреляции. Во-первых, число идентичных элементов оказалось так велико, что имело смысл рассчитать и изготовить две специальные интегральные схемы: двойной 3-каскадный усилитель и интегральный счетчик емкостью 12 бит. Эти два устройства принесли определенную пользу не только для VLA, но и были применены другими радиоастрономическими группами. Во-вторых, система имеет встроенное автоматическое устройство для проверки и замены неисправных элементов. Периодически посылается тест-сигнал, и в случае выхода из строя тех или иных элементов в системе коррелятора и системе задержки они автоматически заменяются запасными элементами.

В функции электронной системы входят также подача контрольных и следящих сигналов. Антенны, вторичные зеркала и различные элементы электроники управляются ЭВМ под контролем специальной цифровой системы. Дополнительно проверяется широкий набор параметров антенн и электронной системы; вся эта информация поступает на центральный пункт для выявления сбоев или возможных ошибок. Некоторые из данных следящей системы используются для калибровки и контроля. Система обрабатывает свыше 200 параметров для каждой антенны, хотя и не все из них являются необходимыми. В целом следящая система является мощным орудием для калибровки, контроля качества данных наблюдений и диагноза возможных инструментальных ошибок. Работа со следящей системой представляет собой существенную часть общего режима работы VLA.

3.4. Вычислительная система

Функции вычислительной системы хорошо сформулированы в проекте создания VLA [24]:

«Вычислительные системы радиотелескопа VLA должны быть организованы таким образом, чтобы в процессе наблюдений оператор выполнял минимум того, что необходимо. Компьютер должен хранить в памяти координаты наблюдаемых объектов и продолжительность сеанса наблюдений. Затем компьютер должен наводить антенны, включать усилители, получать, сводить воедино и записывать сигналы с выходов усилителей, следить за многими десятками контрольных точек усилителя, поддерживать контроль за поведением системы, информировать оператора, если какая-либо из частей системы не исполняет соответствующих функций. После завершения наблюдений

компьютер должен рассортировать данные и перевести их в координатную плоскость $\mu-v$ (плоскость $\mu-v$ есть фурье-образ картинной плоскости), вычислить и ввести различные калибровочные поправки, скомбинировать наблюдения желаемым образом, приписать, по желанию оператора, различные веса, применить преобразование Фурье и, наконец, построить радиокарту исследуемого участка неба. Все это должно выполняться независимо от вычислений, необходимых в процессе наблюдений и в таком темпе, чтобы не задерживать наблюдения. Нельзя допускать накопления незавершенных вычислений».

Соблюдение набора подобных требований является исключительно трудным делом, поэтому создание вычислительной системы VLA представляло собой сложную задачу. Насколько эта задача сложна, было понято с самого начала проектирования. В конце шестидесятых и начале семидесятых годов появилось несколько обстоятельств, сделавших эту работу особенно трудной.

Во-первых, технология изготовления компьютеров, пожалуй, прогрессирует быстрее, чем любая другая технология. Это обстоятельство оказалось удачным для VLA, ибо в противном случае возможности телескопа оказались бы в сильной степени ограничены параметрами вычислительной системы. Однако быстрое развитие технологии привело и к определенным трудностям. В условиях длительной разработки проекта с ограниченными финансовыми возможностями довольно трудно выбрать хорошо сбалансированное решение, которое могло бы использовать все преимущества новых разработок. Во-вторых, за последние годы техника, используемая астрономами при интерферометрических наблюдениях и апертурном синтезе (ввод и вывод данных, дисплей и т. д.), сильно усложнилась. В-третьих, использование неотредактированных или отредактированных ЭВМ массивов данных оказалось более обширным, чем первоначально обсуждалось. В-четвертых, цели, поставленные перед VLA, все время росли по сравнению с первоначально задуманными. Вначале ожидалось, что возможности спектральных наблюдений должны быть довольно скромными. Однако к настоящему времени эта система сильно разрослась и включает 256 частотных каналов. Максимальное разрешение выросло до 0,1" вместо 1" вследствие расширения спектрального интервала до 1 см. Первоначально предполагалось, что поле зрения (число элементов разрешения) будет составлять 100×100 . Теперь мы имеем поле размером 1000×1000 или даже более элементов. Раньше предполагалось, что для построения карты объекта потребуются как минимум несколько часов. Однако VLA оказался столь чувствительным, что можно построить карту источника или исследуемой области всего лишь за несколько минут.

Однако такой метод «моментальной фотографии» требует обработки объема данных, который соответствует полному 8-часовому сеансу наблюдений. Все эти обстоятельства демонстрируют мощь и гибкость VLA, но вместе с тем они существенно увеличивают загрузку вычислительной системы.

Наконец, существует еще одно обстоятельство, усложняющее проблему проектирования вычислительной системы. Количество данных, необходимое для построения полной карты объекта, столь велико, что с ним могут справиться лишь немногие из ЭВМ, доступных астрономам.

Все эти соображения приводят к определенным следствиям, с которыми необходимо было считаться при разработке вычислительной системы VLA. Во-первых, для ЭВМ оказалось больше работы, чем предполагалось вначале. Помогло развитие электроники, и в итоге VLA оказался более мощным инструментом, чем ожидалось раньше. Во-вторых, задача обработки данных оказалась менее четко определенной, поскольку теперь она включает более широкий набор блоков обработки данных, а также целую гамму различных дополнительных программ и методов анализа. С этой точки зрения задача обработки данных становится почти безграничной, что затрудняет ее логическое оформление. В-третьих, не так легко выбрать «наилучший» метод обработки из-за быстрого развития вычислительной техники, а также ограниченности нашего опыта работы с большими массивами данных, получаемых в результате функционирования инструмента типа VLA.

По всем этим причинам было решено не конкретизировать проект системы обработки данных с помощью ЭВМ до тех пор, пока в обращении с VLA не будет накоплен некоторый опыт. Эта система должна расти и эволюционировать вместе с телескопом. Именно такая картина и наблюдается в настоящее время. Разумеется, проектирование и поставки конструктивных блоков ЭВМ можно было бы вести с опережением, обеспечивая гораздо большую мощность по сравнению с первоначально заданной. Однако такой подход оказался бы слишком дорогостоящим.

Итак, при работе с ЭВМ все вычислительные задачи распределяются между двумя основными системами. Имеется компьютер «на линии», работающий в режиме реального времени. Он управляет антеннами, контролирует состояние электронной и следящей систем, осуществляет сбор данных и первый этап калибровки. Как управляющая система этот компьютер запрограммирован таким образом, чтобы участие наблюдателя в его работе было минимальным.

Компьютер «на линии» осуществляет сбор данных, которые затем передаются во вторую вычислительную систему, реализо-

ванную в виде компьютера «вне линии». Эта вторая система производит редукцию и анализ наблюдательных данных, редактирует данные, производит все калибровки и, наконец, с помощью фурье-преобразования строит карту объекта. Система запрограммирована таким образом, что ею можно управлять в очень широких пределах при активном участии наблюдателя. Как конструктивные блоки, так и математическое обеспечение этой второй системы еще находятся в процессе развития и совершенствования.

Анализ астрономических данных представляет собой длительный процесс. Он может затянуться, если у наблюдателя появятся новые идеи и потребуются дополнительные данные. Проектировщики никогда не предполагали, что полный анализ данных, полученных с VLA, должен быть завершен именно на VLA. Было бы неразумно в этом смысле ограничивать наблюдателей. Данные VLA можно записать на магнитную ленту, и наблюдатель может заняться их анализом в другом месте. К сожалению, лишь немногие ЭВМ располагают периферийными устройствами, рассчитанными на анализ данных VLA. Впрочем, эта проблема является общей для многих исследователей, работающих с разными астрономическими инструментами. По-видимому, то или иное решение этой проблемы будет вскоре найдено.

3.5. Временное прекращение разработки проекта

Цикл работ по проектированию VLA в том объеме, как он был описан выше, нашел отражение в I и II томах проекта создания VLA [24, 25]. Затем последовало несколько лет дебатов и обсуждений различных сторон проекта. В обсуждение включились «Комитет Дикке» Национального научного фонда (два заседания 1967 и 1969 гг. [28, 29]) и Комитет по проблемам астрономии Национальной академии наук США. Последний комитет, возглавляемый Дж. Гринстейном, настоятельно рекомендовал рассматривать проект VLA как приоритетный среди других астрономических проектов семидесятых годов [23]. Эта рекомендация, по-видимому, явилась решающим шагом на пути к принятию проекта VLA.

В течение 1967—1968 гг. продолжались некоторые проектные работы. Результаты этих работ описаны в III томе [25]. Затем проектная группа НРАО была распущена и было решено заморозить все проектные работы до тех пор, пока не будет принято окончательное решение о строительстве. Перерыв в работе длился вплоть до весны 1971 г.

4. Строительство

Решение о строительстве VLA было принято конгрессом США и Национальным научным фондом. В 1973 финансовом году, то есть реально с ноября 1972 г., было открыто финансирование. Весной 1971 г. в ожидании финансирования были возобновлены проектные работы по антеннам и электронике, выполнявшиеся под руководством Г. Хватума.

Между Национальным научным фондом и Административно-бюджетным управлением была достигнута договоренность о том, что финансирование программы VLA будет осуществляться в объеме 10 млн. долл. в год. Такой темп привел к затягиванию сроков строительства, увеличению стоимости и задержке ввода в строй инструмента. Однако это имело и свои преимущества. Удалось более тщательно спроектировать и провести проверку отдельных элементов системы, что в общем улучшило работу инструмента. Таким образом, несовпадение темпов финансирования и предложенного графика строительства не нанесло особого ущерба и, возможно, даже оказалось полезным.

Общая стоимость VLA с учетом зятянутого графика строительства оценивалась в 1972 г. суммой 76 млн. долл. Сюда входили 6 % непредвиденных расходов и 6 % ежегодной инфляции. Удивительно, что эта сумма оказалась не так уже далека от оценки шестидесятых годов, равной 40 млн. долл. Поскольку проект VLA был хорошо продуман и большая часть расходов определялась поддающейся расчету стоимостью металлоконструкций (антенны, рельсы), эта первоначальная оценка оказалась вполне разумной. Строительство VLA в рамках бюджета и в соответствии с графиком было поручено НРАО.

Было решено наделить НРАО правами генерального подрядчика, а не передавать исполнение этой функции какой-либо фирме. Вообще, лучше иметь одного подрядчика, чем нескольких. Однако, чтобы соблюсти график, НРАО должна была вести жесткий контроль над работами, чтобы свести к минимуму изменений в проекте, дополнительные расходы при субподрядных работах и быть уверенной, что перед заключением контрактов на изготовление соответствующие чертежи и спецификации полностью закончены. Такой контроль со стороны НРАО был необходим ввиду сложной природы всего проекта, включающего рельсовые конструкции, быстро развивающуюся электронику и технологию компьютеров.

В конце 1972 г. в НРАО была организована Административно-строительная дирекция под руководством Дж. Г. Ланкастера. На эту группу была возложена ответственность за проект, размещение заказов и все аспекты строительства. Г. Хватум сохранял ответственность за общий технический проект. Заказы на

стороне размещались лишь для крупных блоков, таких, как изготовление транспортеров, антенн, облучателей, рельсовой системы, а также строительства зданий и оборудования. Эти внешние контракты составляли около 45 % общей стоимости VLA. Все остальные работы были выполнены персоналом НРАО. В период максимума строительства в 1979 г. на стройке было занято около 130 человек, не считая персонала фирм.

Вскоре после начала работ разразился большой финансовый кризис. Его причинами были война на Ближнем Востоке, эмбарго на поставки нефти, падение курса доллара и растущая инфляция. Чтобы удержаться в пределах запланированной суммы в 76 млн. долл., в проект пришлось внести ряд изменений. Так, была исключена система одновременных наблюдений на двух частотах. Число транспортеров было уменьшено с трех до двух. Эти изменения непосредственно затронули научное использование системы VLA. Одновременно пришлось существенно упростить проекты зданий, используя простые стандартные конструкции вместо первоначально запланированных. Лишь проекты зданий центра управления и кафетерия были оставлены в прежнем виде. По-видимому, стандартные здания не будут столь долговечными, как построенные по специальному проекту. Пришлось также отменить строительство взлетной полосы.

Ввиду изменившейся бюджетной ситуации была отложена реализация ряда элементов проекта. Была временно исключена половина системы промежуточной частоты (что привело к уменьшению чувствительности в $\sqrt{2}$ раз) и на 4 км сокращена длина рельсовых путей (что уменьшило разрешение на $4/21$). Однако в конце концов были найдены резервы экономии в других областях проекта, в частности уменьшена стоимость рельсовых путей. Это позволило восстановить большинство ранее снятых пунктов программы.

4.1. Расположение и конфигурация системы антенн

Для размещения системы VLA потребовалось выполнение обширного комплекса работ, включающего строительство зданий и коммуникаций, прокладку рельсовых путей и подземных волноводов. Строительство зданий и прокладку рельсов осуществляли субподрядчики, волноводы были смонтированы персоналом НРАО. Центральная часть VLA, включая здания и волноводы, показана на рис. 3.

В ходе строительства встретился целый ряд совершенно неожиданных проблем, не имеющих, вообще говоря, непосредственного отношения к созданию телескопа. Первая проблема была связана с выбором места для строительства. Согласно

проекту, северный луч системы должен углубляться на 2 км в один из немногих участков орошаемых земель штата Нью-Мексико. Владельцу земли не понравилась идея размещения антенн среди его угодий, и, естественно, он заломил непомерную цену. Вопрос был решен просто. Северный луч системы был укорочен на 2 км, так что сейчас рельсовый путь кончается прямо перед границей орошаемого участка.

Законы штата Нью-Мексико требуют, чтобы участки земли, отводимые под застройку, исследовались специальной комиссией на предмет выявления мест, интересных в археологическом отношении. Исследование должно быть проведено перед привязкой проекта к местности. Одно такое место было обнаружено около юго-западного луча, и было решено произвести раскопки. Однако никто не хотел платить за эту работу, хотя археологи предполагали, что место является перспективным. Ни штат Нью-Мексико, ни археологический отдел Национального научного фонда, ни университет штата не собирались тратить деньги на раскопки. После долгих препирательств НРАО и радиоастрономия оказали помощь археологии.

Зимой и весной 1978 г. археологическая экспедиция Университета штата Нью-Мексико провела полевые работы. На месте раскопок были обнаружены следы трех культур: Фолсом (возраст 10 тыс. лет), Кочайз (возраст 3 тыс. лет) и Моголлон (возраст примерно 1,5 тыс. лет). Были найдены тысячи предметов: кремневые наконечники, скребки, осколки костей и глиняной посуды, древние инструменты. Все это было тщательно описано и каталогизировано [4].

НРАО первоначально предполагала использовать для передвижки антенн обычные рельсы и шпалы. Был найден поставщик и согласованы цены. Однако в 1973 г. цены на рельсы резко подскочили вверх, далеко за пределы, предусмотренные бюджетом. Вся программа строительства оказалась под угрозой. Отчаянные попытки найти другие источники привели к обнаружению значительных количеств неиспользованных рельсов на военных базах США. С помощью Национального научного фонда удалось добиться списания части рельсов и передачи их НРАО по сходной цене, включающей вывоз из баз и транспортировку в Нью-Мексико. Доступность дешевых рельсов оказалась весьма существенной в плане сохранения бюджета VLA, особенно перед лицом более высокой, чем ожидалось, инфляции. Экономия на рельсах позволила восстановить некоторые замороженные пункты проекта.

Довольно сложной задачей оказалась прокладка волноводов. Чтобы избежать затухания сигнала, а также возникновения паразитных гармоник, радиус кривизны волновода должен быть не менее 1 км. Следовательно, канал для волновода должен

быть плоским и прямым и сохраняться таковым в течение всего времени жизни VLA. Было рассчитано несколько схем прокапывания траншей и прокладки волноводов, которые затем были испытаны в НРАО и на месте расположения VLA. Наиболее удачная схема была опробована вдоль юго-западного луча VLA. Она связывает первые две антенны на участке 3 км. Этот участок волновода был смонтирован на два года раньше остальных. За это время были проведены дополнительные испытания, которые показали, что волновод оседает, причем неравномерно и с неожиданно высокой скоростью. Пришлось модифицировать процедуру укладки волновода, чтобы исключить ухудшение его характеристик со временем. К счастью, проседание первоначально уложенного волновода прекратилось, прежде чем он стал непригодным.

Ввиду важности укладки волноводов для всей работы системы VLA, а также потому, что эта операция требовала особенной тщательности и контроля, все работы производились персоналом НРАО. Этот цикл работ наглядно показал, что именно участие НРАО позволило получить результаты высокого качества в пределах заданной стоимости.

4.2. Антенны и транспортер

Проектирование и изготовление 28 антенн были поручены после тщательного рассмотрения условий контакта и цены фирме «Е-системз инк.». В случае антенн, как и первого транспортера, за проект и изготовление отвечала одна и та же фирма. Такой подход был принят ввиду его преимуществ, связанных с потенциальной экономией при изготовлении 28 аналогичных единиц. Фирма изготовила 28 антенн высокого качества, полностью соответствующих техническому заданию, за разумную цену.

Заключение контракта было осложнено тем обстоятельством, что для достижения экономии при массовом производстве фирма-изготовитель должна была иметь гарантии, что эти 28 антенн будут действительно построены. НРАО, со своей стороны, приходилось действовать в условиях ежегодного утверждения финансирования конгрессом, что не давало возможности оплатить весь контракт единовременно. Интересы обеих сторон были учтены в рамках специального соглашения с фиксированной ценой, где были предусмотрены различные варианты.

Рост цен в 1973 г. привел к новым трудностям. Фирма-изготовитель антенн внезапно обнаружила, что материал для изготовления антенн оказался дороже, чем это предусматривалось. После затянувшихся переговоров пришлось пойти на пересмотр

контракта, к счастью лишь в немногих пунктах. Основные позиции контракта, включая параметры и цену антенн, а также фиксированную стоимость, предусматриваемую контрактом, остались неизменными.

Одно из условий контракта состояло в том, что проект антенн подлежал утверждению со стороны НРАО. В НРАО был разработан собственный вариант проекта антенны, и эти два варианта были сравнены. После утверждения окончательного проекта были изготовлены и смонтированы на месте два модельных образца. Прежде чем началось массовое производство, эти две антенны были тщательно исследованы инженерами НРАО. В течение нескольких лет были изготовлены остальные 26 антенн со средним темпом одна антенна в семь недель. Благодаря тщательности проработки проекта и проведенным натурным испытаниям образцов перед серийным изготовлением потребовалось лишь незначительное число изменений и добавлений и фактическая стоимость почти не отличалась от первоначально запланированной.

После доставки каждая антенна проверялась на предмет соответствия техническому заданию. Затем она перемещалась на специальную монтажную площадку, где персонал НРАО занимался монтажом кабельной проводки, установкой вторичных зеркал, электроники, криогенной техники, освещения, трапов и другого оборудования. После этого антенна передвигалась по рельсам на соответствующую точку системы вдоль одного из лучей. Тут же в паре с другой антенной получались первые образцы интерференционной картины. Когда заработала первая антенна, была разбита символическая бутылка шампанского. Когда же заработал интерферометр и были получены окончательные образцы «первых лепестков», персонал НРАО позволил себе употребить несколько таких бутылок.

Работа с антеннами велась в специальном ангаре высотой 31 м, снабженном кранами и другим оборудованием. Теперь, когда монтаж антенн завершен, это здание используется для профилактики и ремонта. Каждые семь недель периодической проверке подвергается очередная антенна. Таким образом, каждая антенна проходит техническое обслуживание каждые три с половиной года.

Монтажный цех для антенн, не считая нескольких вагончиков, был первым зданием, построенным на площадке VLA. Тогда он бросался в глаза как чужеродное сооружение, совершенно не вписывающееся в прекрасный ландшафт плато Сан-Агустин. Теперь, окруженный 27 антеннами, он выглядит не так уже плохо. Сами же антенны вписываются в пейзаж достаточно органично, по крайней мере с точки зрения радиоастрономов.

Фирма «Е-системз» также спроектировала и изготовила первый транспортер. После нескольких лет эксплуатации его система была несколько изменена, и второй транспортер построен уже по новому проекту.

4.3. Электроника

Большая часть электронной системы VLA была рассчитана и изготовлена персоналом НРАО. Детальная блок-схема аппаратуры с указанием функциональных и конструкторских требований для различных модулей и подсистем была предложена С. Уэйнребом. Эти подсистемы затем были детально проработаны инженерами НРАО (входные устройства, гетеродин, усилитель промежуточной частоты, цифровая система задержки, коррелятор) и фирмами подрядчиками (следающая и контрольная системы, распределение сигнала по волноводам, облучатели). Крупные элементы системы, такие, как силовой генератор, параметрический усилитель и криогенная техника, были заказаны и приобретены на стороне. Большая часть работы по наладке и проверке аппаратуры легла на плечи инженеров НРАО. Те же группы, которые отвечали за расчет тех или иных блоков, несли ответственность и за их изготовление. С учетом опыта, появившегося при монтаже первых единиц оборудования, вся электроника была существенно пересмотрена. Если позволяло время, старые элементы схемы постоянно заменялись новыми. Такая ситуация довольно типична для разработки любой радиоастрономической электронной системы. В случае VLA электроника, как и ожидалось, прошла процесс непрерывной эволюции улучшения. Правда, в условиях жесткого финансирования и четкого графика монтажа такой процесс мог стать опасным. Администрации VLA удалось решить трудную задачу согласования этих двух тенденций, не нарушая при этом график и не выходя за пределы бюджета.

Один аспект конструкции VLA в целом, и электроники в частности, по мере развития проекта привлекал все большее и большее внимание. Речь идет о надежности компонентов. Как только было смонтировано достаточное количество элементов, было проведено исследование статистики отказов. Например, довольно быстро было обнаружено, что компрессоры в системе охлаждения часто выходят из строя. Пришлось подыскать другого поставщика с более надежной продукцией. Были заменены также и другие ненадежные элементы.

4.4. Вычислительная система

Вычислительная система VLA была рассчитана, собрана и запрограммирована персоналом НРАО во главе с Б. Дж. Кларком. Эти работы активно продолжаются и в настоящее время.

Компьютер «на линии» для управления системой антенн был рассчитан и изготовлен на самых ранних стадиях проекта. Математическое обеспечение этого компьютера было развито строго по графику. Первые элементы второго компьютера «вне линии», предназначенного для обработки данных, были также рассчитаны и собраны в начале реализации проекта. Дальнейшее развитие этой системы, а также разработка соответствующего математического обеспечения происходили постепенно по мере накопления опыта работы с частично смонтированной системой антенн. В итоге мощность вычислительной системы отставала от предъявляемых к ней требований (см. разд. 3). По-видимому, такая ситуация сохранится еще в течение некоторого времени. Система обработки данных оказалась узким местом VLA. Однако это обстоятельство не должно влиять на характер выполняемых задач и эффективность VLA.

4.5. Монтаж

Несмотря на возникающие технические проблемы, мелкие организационные неурядицы, случайные помехи и сильную инфляцию, монтаж VLA выполнялся в общем согласно графика и в пределах бюджета и был завершен в начале 1981 г. Общие затраты составили около 78 млн. долл., что более или менее соответствует проектной сумме 1972 г. Именно в то время, когда начался монтаж, были сделаны прогнозы времени завершения (середина 1980 г.) и стоимости (76 млн. долл.). По своим научным характеристикам система VLA достигла или превзошла соответствующие расчетные параметры.

4.6. Переход к наблюдениям

Научные исследования с радиотелескопом VLA были начаты, не дожидаясь полного завершения монтажа. Это не только позволило получить важные научные результаты ранее запланированного срока, но также сделало возможной наладку и доводку аппаратуры, позволило развить технику калибровки, получения и обработки данных, проверить условия эксплуатации антенн.

Наблюдения вместе со всем комплексом сопутствующих операций начались сразу после ввода в строй двух антенн в 1976 г. Официально использование VLA как местными, так и приезжими учеными было начато в 1977 г. Первоначально для наблюдений было доступно шесть антенн. Это число постепенно возрастало по мере того, как вводились в строй очередные антенны. В настоящее время используются все 27 антенн.

Обслуживание системы, как было запланировано, должно было постепенно изменяться с плавным переходом от проблем строительства к нормальной работе. Этот план предусматривал ряд моментов. Во-первых, опыт, накопленный во время монтажа системы, следовало, насколько это возможно, использовать в процессе наблюдений. Во-вторых, большая часть персонала должна была переквалифицироваться из строителей в эксплуатационников. Частично это было связано с причинами, описанными выше, частично диктовалось желанием уменьшить сложности, связанные с необходимостью увольнять людей после окончания строительства. К тому же перспектива постоянной работы облегчала набор высококвалифицированного персонала при строительстве. В-третьих, такой переход должен был произойти с минимальным воздействием на стоимость и условия строительных работ.

В общем переход от строительства к эксплуатации произошел довольно гладко. Возникли некоторые проблемы в связи с тем, что на поздних стадиях строительства общее число людей, занятых на монтаже и эксплуатации вместе, оказалось больше численности персонала, необходимого для эксплуатации. Чтобы избежать найма на временную работу слишком большого контингента, пришлось притормозить общий размах работ. Впрочем, проблема оказалась разрешимой, и удалось поддерживать разумный баланс между монтажом и эксплуатацией. В общем с частично завершенным инструментом удалось выполнить довольно много интересных научных исследований. Некоторые из них будут описаны в заключительном разделе.

5. Перспективы и цели

Опасно без достаточных оснований рассуждать на тему о том, чего можно достичь с новым инструментом. Правда, на стадии проектирования, когда устанавливаются исходные параметры системы, такие прикидки необходимы. Они также нужны, когда вы убеждаете других, что такой инструмент необходимо построить. Обычно в этих случаях составляется «рекламный» проспект, который выглядит очень увлекательно вне зависимости от того, какой инструмент обсуждается. Однако, когда телескоп построен и начал действовать, о его параметрах можно говорить реально. Его фактические характеристики становятся важнее ожидаемых, и зачастую именно неожиданности становятся наиболее интересными.

Частично смонтированная система VLA была доступна для научных исследований в течение четырех лет. Ее возможности в этот период в среднем составляли одну десятую ожидаемых.

Тем не менее проведенные работы продемонстрировали эффективность и размах этого инструмента. В следующих разделах будут описаны параметры системы после ее ввода в строй и проверки. Будут также приведены результаты некоторых ранних наблюдений. При некотором воображении легко понять, почему так много астрономов стремятся к использованию VLA для своих исследований.

5.1. Параметры системы

Ожидаемые характеристики VLA, оцененные по наблюдениям с частично завершенной системой, приведены в табл. 4—7. Чувствительность, указанная в табл. 4, соответствует наблюдениям точечного источника с отношением сигнал/шум, равным пяти. Динамический диапазон является сложной функцией параметров системы и стабильности атмосферы. В табл. 4 приведено некоторое «консервативное» значение. При благоприятных условиях динамический диапазон может достигать значения, превышающего 300:1, и такое значение при наблюдениях с незавершенной системой уже достигнуто.

Таблица 4

Параметры системы VLA

Разрешающая способность	От 0,13 до 350"
Чувствительность *	Не хуже 0,085 мЯн (на уровне 5 σ)
Динамический диапазон *	$\geq 100:1$
Поле зрения	От 1,2 до 30'
Уровень боковых лепестков	Не выше -16 дБ
Интервал длин волн	От 1,3 до 21 см в четырех полосах
Угол обзора неба	$-25^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$

* Для длительности наблюдений 8—12 ч.

Для наблюдений доступны четыре спектральные полосы. Переход от одной полосы к другой осуществляется за время менее одной минуты, что весьма ценно, поскольку позволяет довольно легко построить непрерывный спектр источника. Коротковолновая граница наблюдаемого спектра, равная 1,3 см, определяется характеристиками антенн. Наибольшая длина волны, на которой можно наблюдать в кассегреновской комбинации, вероятно, составляет 21 см. На более длинных волнах дифракционный размер пучка, падающего на вторичное зеркало, становится слишком большим. Возможны наблюдения и в других спектральных полосах внутри диапазона 1,3—21 см. В будущем предусматриваются наблюдения и на длинах волн

больше 21 см, но не в касегреновской комбинации, а в первичном фокусе. Правда, при этом уже нельзя будет быстро менять спектральные интервалы, как это делается сейчас. Некоторые характеристики антенн и приемного тракта приведены в табл. 5.

Таблица 5

Параметры антенн и электроники

Длина волн, см	Эффективная апертура антенны, %	Температура системы, К	Среднеквадратичный уровень шумов *, мЯн
18—21	50	50	0,02
6	65	50	0,02
2	54	240	0,10
1,3	46	290	0,14

* При 27 антеннах, полосе частот 50 МГц и времени наблюдения 8 ч.

Антенны можно располагать в четырех различных конфигурациях, обозначаемых буквами А, В, С, D (см. табл. 6). Все эти конфигурации имеют различное разрешение и чувствительность и позволяют варьировать возможности инструмента в зависимости от характера различных задач.

Таблица 6

Размер диаграммы направленности VLA

Длина волны, см	Размер диаграммы индивидуальной антенны	Размер диаграммы системы *			
		А	В	С	Д
18—21	26—30'	2,0''	6,6''	22''	71''
5	8,6	0,6	2,0	6,5	21
2	2,9	0,2	0,7	2,2	7,1
1,3	1,9	0,13	0,4	1,4	4,6
Эффективное поле зрения **		1,2'	3,9'	13'	42'

* Для 27 антенн, при сеансе наблюдений 8 ч, на уровне контрастности 15 дБ.

** Для полосы частот 50 МГц.

Поле зрения системы антенн может быть ограничено шириной диаграммы направленности индивидуальной антенны (см. табл. 6) или величиной «эффективного поля зрения», которое

представляет собой меру дисторсии и виньетирования поля зрения системы от центра к краю в результате потери когерентности. Свои ограничения на поле зрения накладывает и применяемый фурье-метод обработки данных наблюдений. Самое низкое значение этого параметра в табл. 6 дано для полосы 50 МГц; оно не зависит от длины волны. Наибольшее значение, достигаемое для длины волны 21 см, определяется диаграммами направленности отдельных антенн. Можно анализировать и большие поля, в 2—3 раза превышающие первичную диаграмму направленности, хотя здесь сильное влияние оказывает виньетирование. Например, для выявления паразитных источников на длине волны 21 см можно изучать поля размером $80' \times 80'$.

Для изучения спектральных линий доступны различные комбинации разрешения по частоте и ширины полосы: от 16 каналов с разрешением 3,125 МГц и полосой 50 МГц до 256 каналов с разрешением 381 Гц и шириной 97 кГц. Некоторые из этих комбинаций приведены в табл. 7.

Таблица 7

**Параметры спектральной аппаратуры
для D-комбинации антенн**

Разрешение по частоте	Число каналов	Ширина полосы	Антенная температура, К, на разных длинах волн *			
			21—18 см	6 см	2 см	1,3 см
763 Гц	512	391 кГц	5,0	12	80	113
12,2 кГц	512	6,25 МГц	1,2	0,77	5,1	7,2
48,8 кГц	256	12,5 МГц	0,63	0,38	2,6	3,6

* 27 антенн, время наблюдений 8 ч.

Для получения карты источника с максимальными чувствительностью, разрешением и динамическим диапазоном требуется от 8 до 12 ч наблюдений. Однако система сохраняет высокую чувствительность и при малых временах. Например, если допустить высокий уровень боковых лепестков и малый динамический диапазон, то чувствительности 1 мЯн на длине волны 6 см можно достичь за 5 мин. Это делает возможным проведение широкого диапазона статистических исследований, наблюдений переменности, поисков новых явлений или новых источников. Такая «сокращенная» процедура (метод «моментальной фотографии») была уже реализована с неполной системой антенн, и можно ожидать, что весь телескоп VLA будет в этом отношении весьма эффективен.

Детальный набор параметров VLA довольно сложен; это относится особенно к таким параметрам, как динамический диапазон, поле зрения и возможность спектральных наблюдений. Многие из этих параметров находятся под прямым контролем наблюдателя, который может варьировать их с целью обеспечить наилучшее решение задачи. Более подробное описание параметров VLA можно найти в руководстве для наблюдений с VLA [15] и в обзоре Томпсона и др. [38].

5.2. Исследования Солнечной системы и Галактики

Система VLA может быть использована для исследования самых различных объектов от Солнечной системы до Галактики, включая определение положения точки весеннего равноденствия по наблюдениям астероидов и измерение межзвездного магнитного поля по зеемановскому расщеплению линии 21 см. Приведем несколько примеров.

Солнце. Можно ожидать, что VLA позволит достигнуть значительного прогресса в изучении активных областей на Солнце. Радиоизлучение, связанное с активными областями и солнечными вспышками, было известно в течение ряда лет. Исследование свойств такого излучения обеспечивает получение полезной информации об электронах высоких энергий, генерируемых во время вспышек, и магнитных полях, связанных с активными областями. Радионаблюдения могут дать ключ к пониманию физических процессов в таких областях. При этом требуется высокое пространственное и временное разрешение, поскольку исследуемые области малы и протекающие в них явления быстротечны.

С телескопом VLA, работающим в режиме «моментальной фотографии», можно получать карты активных областей с пространственным разрешением $0.1\text{--}1''$ и временным разрешением порядка 10 с. Для исследования активных областей на Солнце такие карты окажутся исключительно полезными.

С частично смонтированным набором антенн уже были проведены некоторые солнечные исследования. Так, например, Марш и Харфорд [20] получили карты нескольких вспышек на длинах волн 2 и 1,3 см с разрешением $1''$ за время порядка 10 с. Они нашли, что в каждом случае радиоизлучение приходит сначала от компактных источников, расположенных между ядрами вспышки в линии $H\alpha$. По мере развития вспышки область радиоизлучения увеличивается и приобретает форму, вытянутую вдоль силовых линий магнитного поля, соединяющих центры эмиссии $H\alpha$.

Гибкость VLA, выражающаяся в возможности наблюдений группами антенн на различных частотах, а также быстрого переключения частот, исключительно полезна при создании трехмерной картины вспышек на различных высотах в атмосфере Солнца. Изображения на различных частотах отличаются друг от друга, что позволяет изучать оптические толщины и структуру магнитного поля в области вспышки.

Астрономы-солнечники обнаруживают доказательства быстрых мелкомасштабных магнитных вариаций во вспышках. Они надеются, что поляризационные измерения с VLA дадут возможность понять природу этих вариаций.

При выполнении другой программы [19] с помощью VLA наблюдались области солнечной активности на длине волны 6 см с разрешением 3,5". Было обнаружено, что радиоизлучение формируется в петлеобразной структуре, связанной с двумя солнечными пятнами противоположной полярности. Внутри этой петлеобразной структуры наблюдалось несколько компактных источников. Авторы работы [19] предполагают, что диффузное излучение в петле является тепловым излучением оптически тонкого газа с температурой 10^6 К, тогда как излучение компактных источников является гирорезонансным.

Эти и подобные уже выполняемые программы демонстрируют потенциальные возможности VLA для изучения солнечных активных областей. Полный набор антенн позволит достичь еще больших чувствительности и разрешения при выполнении исследований, которые внесут весомый вклад в наше понимание природы Солнца.

Планеты. Атмосферы планет-гигантов, а также Венеры и Титана непрозрачны для оптического излучения. Поверхности этих планет, как и нижние слои атмосфер, можно изучать только с помощью радиоволн. Лишь VLA обладает достаточной разрешающей способностью и чувствительностью для обнаружения малых деталей поверхностей, а также для построения карты крупных объектов. Система VLA может регистрировать с определенным разрешением тепловое излучение всех планет (за исключением, вероятно, Плутона) и ряда спутников, включая Титан и галилеевы спутники Юпитера. Таким образом, VLA будет применяться для изучения нижних слоев атмосфер и поверхностей планет и спутников. Например, наблюдения эффекта потемнения к краю с высоким разрешением в сочетании с изучением зависимости температуры поверхности от длины волны дают возможность выяснить распределение радиопоглощающих агентов в атмосферах Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна.



Рис. 6. Радиокарта Юпитера на длине волны 20 см, полученная с помощью VLA. Долгота центрального меридиана составляет (по часовой стрелке, начиная с верхнего левого изображения) соответственно 119, 214, 304 и 319°. Расстояние между двумя яркими пятнами на каждом изображении равно примерно 50". Ширина диаграммы направленности на половине интенсивности составляет 2,2"×5,5" (Берг, Бигнелл, Робертс, готовится к печати).

Систему VLA можно также использовать для изучения нетепловых эффектов в радиоизлучении типа возбуждаемых Юпитером. Результаты наблюдений Юпитера с VLA на волне 20 см в четырех положениях по долготе показаны на рис. 6. Ясно различается тепловое излучение диска, а также более сложное распределение нетеплового излучения в радиационных поясах. Наблюдения были проведены Дж. А. Робертсом, Дж. К. Бергом и Р. К. Бигнеллом.

Астрометрия. Радиоастрометрия является относительно новым и многообещающим направлением исследований. Интерферо-

метрическая техника VLA, как, впрочем, и других интерферометров, позволяет непосредственно измерять склонения независимо от каких-либо установленных оптически координатных систем. Точность таких измерений ограничивается лишь разрешающей способностью и стабильностью телескопа. Для VLA эта точность составляет $0,05''$ для единичного измерения. С такой же точностью можно измерять дифференциальные прямые восхождения. В настоящее время для системы прямых восхождений необходимо установить нуль-пункт из оптических наблюдений. Однако чувствительность VLA столь высока, что позволяет наблюдать наиболее яркие астероиды и тем самым осуществить привязку непосредственно к точке весеннего равноденствия. Таким образом, с помощью VLA можно установить относительно свободную от местных систематических ошибок и полностью независимую от оптических наблюдений систему отсчета, причем по всему небу. Далее, привязываясь к удаленным внегалактическим источникам, можно построить истинную «инерциальную» систему отсчета.

Повторные наблюдения в течение долгого периода времени можно использовать для уточнения определенных геофизических постоянных, таких, как постоянная прецессии и характеристики земных приливов. Многие измерения, необходимые для этой цели, требуются также для калибровки системы VLA. Следовательно, наблюдения с целью калибровки и астрометрические наблюдения можно объединить в одну долговременную программу.

Спектроскопия. С вводом в действие в 1981 г. системы наблюдений в спектральных линиях монтаж VLA можно считать завершенным. Эта система окажется крайне полезной для изучения нейтрального водорода и многих молекул как в нашей, так и в других галактиках. Внутри спектрального диапазона, доступного VLA, лежат линии по крайней мере одиннадцати молекул.

С незаконченной спектральной аппаратурой и недостаточно разработанным алгоритмом обработки данных в настоящее время возможны лишь простейшие исследования спектральных линий. Большинство программ рассчитано на использование высокой чувствительности системы VLA для измерения положений и лучевых скоростей формальдегидных и OH-мазеров в нашей Галактике.

Изучение пространственного распределения и скоростей OH- и H_2O -мазеров дает сведения о ранних стадиях эволюции протозвезд, в которых еще не начались ядерные реакции. Например, С. Хансен и К. Джонстон (работа готовится к печати) исследовали распределение в пространстве и кинематику

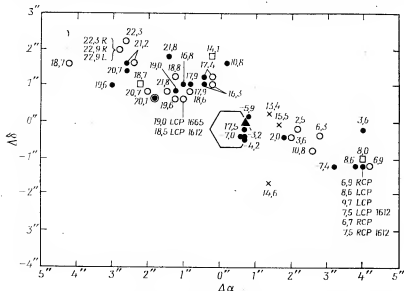


Рис. 7. Положения и лучевые скорости ОН-мазеров в источнике Орион А, измеренные с помощью VLA. Каждый кружок (1665 МГц) или квадратик (1612 МГц) соответствует одному или нескольким мазерам. Лучевые скорости указаны около каждого объекта. Шестиугольником отмечено положение инфракрасного источника IRC 2. Треугольником отмечен мазер SiO. Центр карты соответствует координатам $\alpha = 5^h 32^m 45.05^s$; $\delta = -5^\circ 24' 23''$ (1950). Абсолютная ошибка координат порядка $1''$; относительные координаты известны лучше $0.2''$ (Хансен, Джонстон, готовится к печати).

ОН-мазеров в созвездии Ориона. Соответствующая карта, полученная с помощью VLA, приведена на рис. 7. На этом рисунке показано большое число ОН-мазеров в области источника Орион А и отмечены их лучевые скорости. ОН-мазеры распределены симметрично относительно инфракрасного источника и мазера SiO, располагающихся в центре картины. Средняя скорость ОН-мазеров по одну сторону от центра составляет 19 км/с , а по другую 7 км/с . Простейшая модель такого распределения соответствует уплощенному диску, гравитационно связанному с центральным объектом, масса которого равна 80 солнечным массам. В центре объекта, который, по-видимому, представляет собой массивную формирующуюся звезду, могут возникать мазеры SiO (показаны на рис. 7 треугольником). Изучение мазеров ОН, H_2O и формальдегида, как и других свидетельств звездообразования, например компактных облаков аммиака, будет, по-видимому, составлять существенную часть будущих спектральных исследований с VLA.

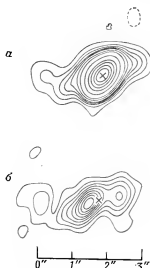
Другой областью применения спектральной техники VLA может быть изучение линий поглощения HI и OH в нашей и других галактиках. Для таких исследований может потребоваться полная мощь VLA как в смысле частотного, так и пространственного разрешения. Изучение поглощения в направлении на ядра галактик позволит получить сведения о некруговых движениях в этих галактиках. Изучение поглощения HI в излучении источников, просвечивающих внешние области галактик, обеспечит информацию о скорости движений и состоянии вещества в этих областях, недоступных другим методам исследования.

Возможности радиоспектроскопии с пространственным разрешением лучше 30'' пока практически не раскрыты. До настоящего времени такие наблюдения были ограничены помехами со стороны линии поглощения 21 см нейтрального водорода, а также низкой чувствительностью интерферометров с большими базами при наблюдениях OH- и H₂O-мазеров. С помощью VLA станут доступными новые спектральные диапазоны с высокими пространственным разрешением и чувствительностью. Ввиду того что в этой области известно довольно мало, трудно предсказать определенно, каких результатов можно ожидать. Несомненно, однако, что исследования такого рода будут весьма интересны.

Звезды и области III. Когда начиналось проектирование VLA о радиоизлучении звезд, за исключением Солнца, ничего не было известно. В наши дни радиоизлучение наблюдается от звезд многих типов. За немногими исключениями, радиоизлучение звезд не поддается разрешению даже при разрешающей способности VLA, равной 0,1—1''. Тем не менее VLA интенсивно используется для изучения звезд. Высокая чувствительность VLA позволяет наблюдать удаленные звезды и тем самым расширить выборку, необходимую для статистических исследований. Можно также регистрировать близкие звезды низких светимостей, что расширяет диапазон наблюдаемых явлений. Наконец, эффективность и высокая чувствительность VLA делают возможными разнообразные исследования радиопеременности.

SS 433. На рис. 8 воспроизведено радиоизображение пекулярной звезды SS 433 на волне 6 см. Наблюдения были выполнены 5 апреля 1980 г. Г. М. Хьеллмингом и К. Дж. Джонстоном (частное сообщение). К настоящему времени они построили радиокарты объекта для шести эпох и нашли, что радиоструктура резко меняется от месяца к месяцу. Излучение «выбросов» на 15% является поляризованным. Авторы предполагают, что за радиоизлучение ответственны частицы и поля, возникающие

Рис. 8. Полученная с помощью VLA карта объекта SS 433 на волне 6 см (5 апреля 1980 г.). *а* — контуры общей интенсивности. Изофоты соответствуют уровням —1, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 20, 35, 50, 65 и 80 % максимальной интенсивности, составляющей 340 мЯн. *б* — интенсивность линейно-поляризованного излучения. Изофоты соответствуют уровням 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 и 90 % максимальной интенсивности, равной 4,2 мЯн. Штриховой кружок на рис. 8, *а* указывает общий для обоих контуров размер диаграммы направленности, составляющий на половине максимальной интенсивности $0,5'' \times 0,8''$. Положение SS 433 по оптическим данным указано крестиком (Хьеллминг, Джонстон, готовится к печати).



при втекании вещества вдоль полюсов прецессирующего аккреционного диска.

Потеря массы. Феномен звездного ветра и связанной с ним потери массы является ключевым в эволюции звезд и взаимодействии звезд и межзвездной среды. В исследовании этого феномена важную роль может играть и VLA. На значение VLA в изучении проблемы потери массы звездами ранних спектральных классов было указано Барлоу [3]. При чувствительности полного набора антенн 0,05 мЯн на волне 6 см при уровне достоверности 3σ с помощью VLA можно обнаружить сверхгигант спектрального класса В типа Р Cyg на расстоянии 24 кпс, звезду Вольфа—Райе типа γ Vel на расстоянии 13 кпс и звезду главной последовательности класса О8 на расстоянии 700 пс. Для определения скорости потери массы необходимо знать только радиопоток, граничную скорость звездного ветра и расстояние. Уже сообщалось о некоторых работах такого рода. Например, Аббот и др. [1] провели наблюдения 15 звезд классов О, В и А с 17 антеннами VLA в ноябре 1978 и июле 1979 гг. Они зарегистрировали радиопоток от шести таких звезд и получили оценки скорости потери массы от $2 \cdot 10^{-6}$ до $25 \cdot 10^{-6}$ масс Солнца в год.

Потеря массы обнаружена и у звезд поздних спектральных классов. В программах наблюдений VLA уделяется внимание также изучению потери массы сверхгигантами и пекулярными звездами класса М, звездами типа Т Тау и другими объектами поздних спектральных классов.

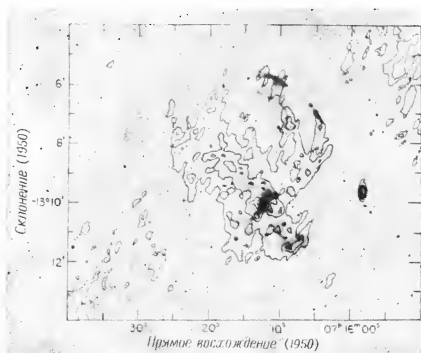


Рис. 9. Кольцевая туманность NGC 2359. Карта, полученная с помощью VLA на волне 20 см, наложена на оптическое изображение в линиях [OIII]. Уровни изофот составляют 1, 2, 3, 4, 5 и 6 мЯи на размер диаграммы направленности, которая изображена в виде точечного источника к западу от туманности. Для достижения высокой чувствительности наблюдения проводились с 11 антеннами и диаграммой размером $10'' \times 20''$ [36].

NGC 2359. На рис. 9 приведена карта оптического и радиоизлучения кольцевой туманности NGC 2359 по данным Шнепса и др. [36]. Авторы предполагают, что туманность образована в результате истечения звездного ветра с поверхности звезды Вольфа—Райе. Радиоизлучение самой звезды не обнаружено. По оценкам авторов, верхний предел скорости потери массы составляет $7 \cdot 10^{-5}$ масс Солнца в год. В целом по туманности наблюдается хорошее совпадение оптического и радиоизлучения. Наблюдаемое отсутствие оптического излучения в северо-восточной части туманности, вероятно, объясняется поглощением света. Шнепс и др. [36] использовали оптические и радионаблюдения вместе с наблюдениями распределения CO для изучения эволюции оболочки, образованной звездным ветром.

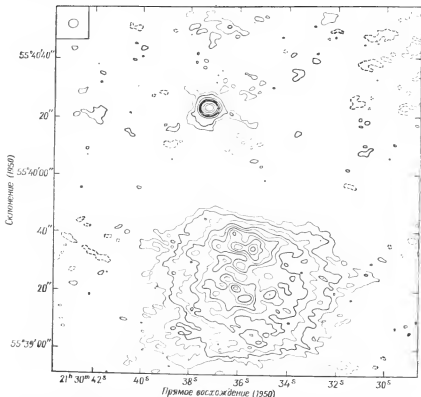


Рис. 10. Карта области III S 128 на длине волны 20 см. Интенсивность излучения яркого источника на севере составляет 33 мЯн на размер диаграммы. Уровни изотоп равны —5, 5, 10, 20, 30, 50, 70 и 90 % интенсивности в максимуме. Размер диаграммы направленности показан в верхнем левом углу [16].

S 128. На рис. 10 показана область III S 128, изученная с помощью VLA Хо и др. [16]. Помимо наблюдений на волне 20 см, результаты которых показаны на рисунке, выполнялись также наблюдения на волне 6 см. Комбинация радиоастрономических наблюдений с VLA и оптических наблюдений позволяет изучить звездообразование в этой области. Компактный источник в северной части разрешается; его излучение является тепловым. Авторы предполагают, что здесь имеются три различные области звездообразования: компактный источник, протяженный источник и источник H_2O чуть к северу от компактного. Здесь, как и в других подобных исследованиях, большую роль играет возможность изучения объектов на двух длинах волн при сравнимых разрешениях.

5.3. Внегалактические исследования

Первоначальным стимулом для конструирования и создания телескопа VLA послужили проблемы, связанные с исследованием радиогалактик. Хотя за прошедшие годы в этой области получены разнообразные результаты, многое еще продолжает оставаться неизвестным. Наблюдения радиогалактик занимают значительную часть общего времени использования VLA с начала работы инструмента. Вероятно, такое положение сохра-

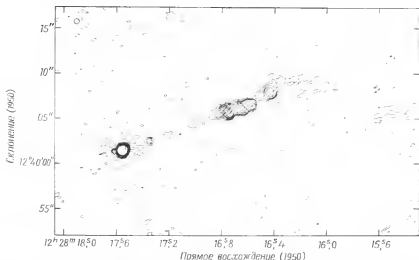


Рис. 11. Радиокарта галактики M87 на длине волны 2 см (15 035 МГц). Ядро галактики совпадает с ярким источником в левом нижнем углу. Размер диаграммы направленности, составляющий 0,8", показан в верхнем левом углу. Уровни изофот соответствуют 35, 30, 25, 20, 16, 12, 8, 6, 4, 3, 2, 1 $\times 10,17$ мЯн на размер диаграммы [32].

няется и в будущем. Очевидно, что наблюдения с VLA детальной структуры и поляризации радионисточников, особенно таких деталей, как выбросы и хвосты, вносят значительный вклад в наше понимание природы этих объектов и природы межгалактической плазмы и магнитных полей.

Система VLA используется также для изучения радиосвойств других внегалактических объектов, таких, как квазары, галактики Сейферта, «нормальные», спиральные и эллиптические галактики. Высокие разрешающая способность и чувствительность VLA позволяют обнаруживать неизвестные ранее новые явления в этих объектах.

Одной из трудностей многих радиоастрономических исследований является отсутствие индикаторов расстояний в радиодиа-

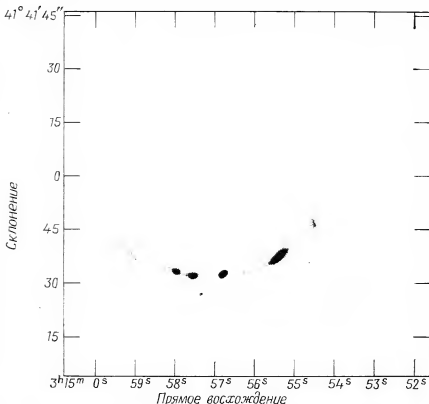


Рис. 12. Радиокарта галактики NGC 1265, полученная с помощью VLA на длине волны 6 см (4886 МГц). Изофоты убраны и оставлен только поток более 5 мЯн, на размер диаграммы направленности (размер на половине интенсивности равен $1,4'' \times 1,0''$) [31].

пазоне. Можно надеяться, что исследования с VLA стимулируют и облегчат поиски новых индикаторов расстояний.

Радиогалактики. Наблюдения с VLA уже обеспечили массу данных относительно выбросов, хвостов и других структурных деталей радиогалактик. Некоторые примеры приведены на рис. 11—16.

M 87. Эта галактика является наиболее известной и интенсивно изучаемой. Она имеет как радио-, так и оптический выброс («джет»). На рис. 11 изображена карта объекта по наблюдениям с 12 антеннами в марте 1979 г. Это единственный объект, в котором можно непосредственно сравнивать оптические и

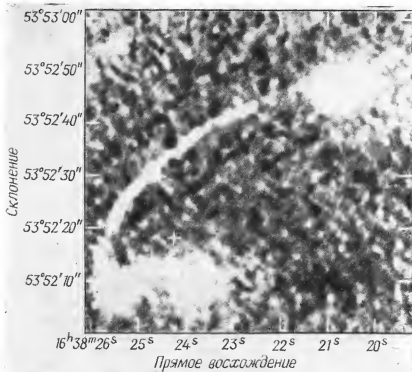


Рис. 13. Радиокарта объекта 1638+538 на длине волны 6 см (4885 МГц), полученная с помощью VLA. Интенсивность в максимуме равна 11,8 мЯн на размер диаграммы. В верхнем левом углу показан размер диаграммы на половине интенсивности. Радиисточник отождествляется с ярчайшей галактикой в богатом скоплении. Оптическое положение галактики показано крестиком вблизи центрального компонента источника [6].

радионизображения в центральной части галактики. Оуэн и др. [32] показали на основе детального сравнения, что распределения оптической и радиояркости вдоль всего выброса весьма сходны.

NGC 1265. Эта галактика является прототипом и наиболее изучаемым объектом типа «кометообразных» галактик. Впервые она была исследована Райлом и Уиндрэмом [34]. Принято считать, что кометообразная форма является результатом взаимодействия движущейся галактики с окружающей средой. В ноябре 1977 г. Оуэн и др. [31] получили с помощью 7 антенн радиокарту NGC 1265, приведенную на рис. 12. Здесь показана только внутренняя часть протяженного источника. Источ-

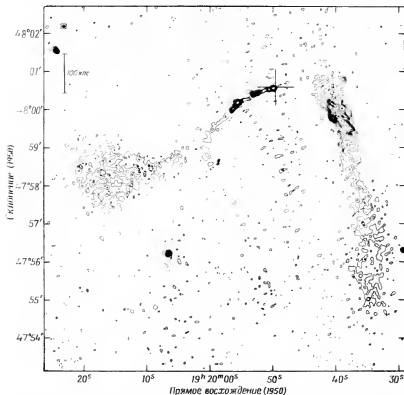


Рис. 14. Карта источника 1919+479 на длине волны 20 см (1480 МГц), полученная с помощью VLA. Изофоты проведены с интервалом 0,4 мЯн на размер диаграммы направленности, а интенсивность в максимуме равна 13,4 мЯн на размер диаграммы. Крестиком отмечено положение оптической сD-галактики, отождествляемой с радиоисточником [5].

ник в целом располагается внутри обширного оптического гало галактики, имеющего низкую поверхностную яркость.

1638+538. Этот источник, по-видимому, подобен NGC 1265, но примерно в пять раз больше по размерам (рис. 13). Приведенная карта была получена на системе VLA в ноябре 1978 г. Бернсом и Оуэном [6] с 11 антеннами. Она показывает два длинных изогнутых выброса, истекающих из ядра галактики и оканчивающихся более диффузными «каплями», или хвостами. Как и в случае NGC 1265, выбросы лежат в основном внутри оптического изображения галактики, а хвосты выходят за пределы оптического изображения.

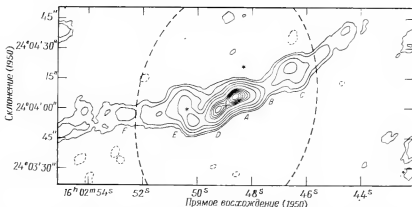


Рис. 15. Радиокарта источника 4C 24.26 на волне 20 см (1480 МГц), полученная с помощью VLA. Уровни изофот составляют $-1,8$, $-0,9$, $0,9$, $1,8$, $4,5$, $9,0$, 18 , 36 , 45 , 54 , 63 , 72 , 81 и 90 мЯн на размер диаграммы направленности. Крестиком отмечено положение центра галактики NGC 6051 и штриховым эллипсом — ее оптические размеры [7].

1919 + 479. На рис. 14 приведена карта объекта, полученная с 16 антеннами в августе 1979 г. Структура источника весьма сложная. Наблюдается единичный длинный и изогнутый выброс, в котором можно выделить два отдельных «пятна». Хвосты с каждой стороны, по-видимому, симметричны [5].

NGC 6051. Это галактика типа cD, входящая в состав бедного скопления. Радиокарта объекта, приведенная на рис. 15, подобна картам большинства «хвостатых» радиогалактик в богатых скоплениях. Однако в данном случае большая часть структуры хвостов наблюдается внутри оптического изображения галактики, а не на фоне межгалактической среды [7]. Крисс с соавторами [18] провел наблюдения NGC 6051 с обсерваторией им. Эйнштейна и обнаружил, что рентгеновское и радионизображения объекта более или менее сходны.

3C 315. Этот объект показан на рис. 16. Он отличается весьма сложной структурой. Наблюдения были проведены Фомалоном, Бриндом, Хейбмом и Уиллсом (частное сообщение). Радиоисточник связан с тесной парой галактик. Для объяснения наблюдаемой морфологии можно привлечь эффект быстрой прецессии радиовыбросов.

Вышеприведенные примеры показывают, что телескоп VLA предоставляет огромное количество детальных количественных сведений о наблюдаемых объектах. Эти данные могут служить основой для развития и проверки теорий, объясняющих общие

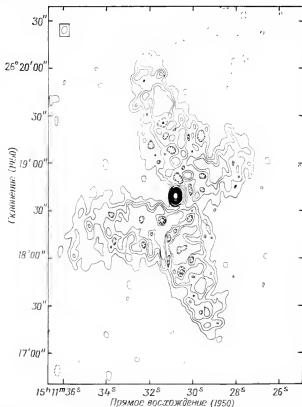


Рис. 16. Радиокарта источника 3C 315 на длине волны 6 см (4885 МГц). Интенсивность в максимуме равна 125 мЯн на размер диаграммы. Изофоты проведены при значениях —1, 1, 2, 3, 4, 8, 12, 16, 20, 30, 40, 50, 70 и 90 мЯн на размер диаграммы направленности (Фомалон, Бридл, Хёгбом, Уиллс, готовится к печати).

свойства явлений, наблюдаемых в радиогалактиках. Кажется вероятным, что в течение нескольких ближайших лет в нашем понимании физических процессов, определяющих природу таких объектов, наступит существенный прогресс. Детальный обзор свойств протяженных радиисточников, основанный главным образом на недавних наблюдениях с VLA, опубликован недавно Фомалоном [13].

Большинство из перечисленных работ относится к близким галактикам, при наблюдении которых можно пренебречь эволюционными и космологическими эффектами. По мере повышения мощности VLA внимание наблюдателей будет обра-

щаться к более далеким объектам, что позволит изучать их эволюцию и эволюцию Вселенной.

Другое направление исследований заключается в выяснении взаимосвязи между квазарами, радиогалактиками и другими внегалактическими источниками. Некоторые исследования такого рода уже ведутся, они кратко описаны ниже. Опять по мере развития полной мощи VLA будут предприняты наблюдения далеких объектов или близких источников пониженной светимости.

Квazarы. В настоящее время значительный интерес вызывает фундаментальная проблема различия между квазарами и радиоспокойными квазизвездными объектами. Для изучения этой проблемы с помощью VLA выполнялись и выполняются различные наблюдательные программы. Кондон и др. [11] в июне 1978 г. предприняли исследование выборки из 22 оптически ярких квазаров на волне 6 см с использованием 9 антенн. В пределах чувствительности 0,5 мЯн у 9 из числа изученных квазаров было зарегистрировано радиоизлучение. Пределы радио- и оптического потоков, принятые для этого обзора, налагают определенные ограничения на форму наблюдаемого спектра. Так, если квазар не обнаруживается на радиочастотах, он должен иметь спектральное распределение, растущее от радио- к оптическому диапазону. Авторы не обнаружили фундаментальных различий между активными квазарами и радиоспокойными квазизвездными объектами, хотя такая разница ранее предполагалась. Учитывая результаты других исследований, включающих оптически более слабые квазары, Кондон и др. [11] пришли к выводу, что отношение радиосветимости квазаров к оптической светимости может зависеть от их оптических свойств или от степени удаленности объекта.

Другие галактики. Система VLA широко используется для исследований радиохарактеристик внегалактических объектов других типов, таких, как сейфертовские галактики, эллиптические и спиральные галактики, объекты типа BL Lac. Такие исследования преследуют две цели: улучшение понимания физических процессов и выяснение взаимосвязей между различными типами изучаемых объектов.

NGC 1052. Структура радиоизлучения близкой эллиптической галактики NGC 1052 на волне 20 см показана на рис. 17 (Дж. М. Вробел и Д. С. Хишен, готовится к печати). Радиоизофоты с ядром и двумя более слабыми внешними компонентами на волне 20 см являются типичными для многих радиогалактик. Центральный источник не разрешается на этой волне, он имеет синхротронный спектр с самопоглощением. Более

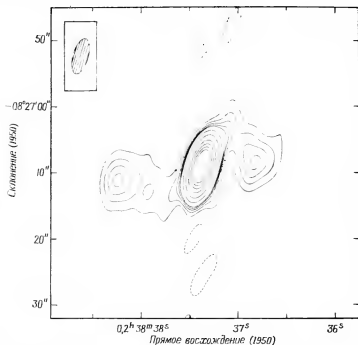


Рис. 17. Карта эллиптической галактики NGC 1052 на длине волны 20 см (1465 МГц). Уровни изотоп равны —0,55, 0,55, 1,1, 1,65, 2,2, 2,75, 5,5, 11, 22, 33, 44 и 55 % от интенсивности в максимуме, составляющей 734 мЯн на размер диаграммы направленности (Вробел, Хишен, готовится к печати).

слабые компоненты имеют типичные крутые нетепловые спектры. Радиосветимость NGC 1052 существенно меньше, чем у большинства типичных радиогалактик и имеет промежуточное значение между светимостями радио- и «нормальных» эллиптических галактик.

NGC 5548. Это спиральная галактика с сейфертовским ядром I типа. На рис. 18 приведена карта источника на волне 6 см. Центральный компонент совпадает с оптическим ядром галактики. Отметим, что кратные радиокомпоненты характерны лишь для немногих из сейфертовских галактик. С диаграммой направленности $2,5'' \times 1,5''$ центральный компонент не разрешается. И в этом случае геометрия источника подобна наблюдаемой у большинства радиогалактик, хотя светимость много ниже (Уилсон, Улвестад, Шрамек, работа готовится к печати).

NGC 3310. Радиокарта этой пекулярной спиральной галактики (рис. 19), полученная при помощи VLA, показывает тесное

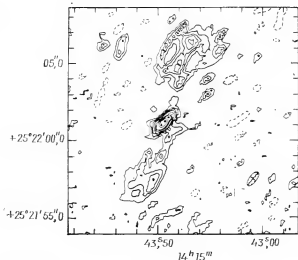


Рис. 18. Изображение сейфертовской галактики NGC 5548, полученное при помощи VLA на волне 6 см. Компактный источник в центре совпадает с оптическим ядром галактики, генерирующим нетепловой непрерывный спектр. Уровни изотоп равны —10, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 70 и 90 % центральной интенсивности, равной 1,38 мЯн на размер диаграммы направленности (эллипс внизу справа). (Уилсон, Улвестад, Шрабек, готовится к печати).

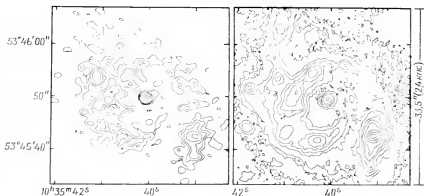


Рис. 19. Распределение радиояркости на волне 6 см (слева) и оптического излучения спиральной галактики NGC 3310 в линии H α . Радиоизотопы, полученные с помощью VLA, соответствуют 10, 20, 30, 50, 70 и 90 % центральной интенсивности, равной 24,5 мЯн на размер диаграммы направленности (1,1" \times 1,4"). Карта справа показывает распределение эмиссии в линии H α в том же масштабе и примерно с тем же разрешением [2].

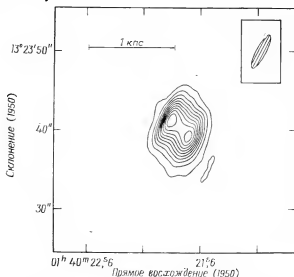


Рис. 20. Раднoкарта спиральной галактики NGC 660, полученная с помощью VLA на волне 6 см (4885 МГц). Изофоты проведены через интервал 2 мЯн на размер диаграммы направленности, приведенной в верхнем правом углу [10]. В этом, а также в ряде других случаев эллиптическая форма сечения диаграммы направленности связана с тем обстоятельством, что для наблюдений объектов на низких склонениях был использован только один луч системы антенн. Полный набор антенн дает сечение круглой формы.

сходство с распределением $\text{H}\alpha$ -эмиссии [2]. Радиопоток от юго-западного источника, равный 10 мЯн, вызван тепловым излучением большой области HII, видимой на фотографии в линии $\text{H}\alpha$. Другие источники имеют нетепловой синхротронный спектр. Эти источники могут быть связаны с остатками сверхновых в областях недавнего звездообразования.

NGC 660. На рис. 20 показан пример двойного источника в спиральной галактике. Этот источник может быть либо на самом деле двойным, либо состоять из ядра и выброса, либо представлять собой кольцо, видимое под некоторым углом. Спектр источника нетепловой. Кондон [10] высказал предположение, что радиоизлучение может быть вызвано недавними процессами звездообразования во внутренних частях галактики.

Маркарян 8. На рис. 21 приведено распределение радиоизлучения на волне 6 см иррегулярной «комковатой» галактики Маркарян 8 (Хишен, Хейдеманн, Иин, работа готовится к печати). Как и в случае NGC 331, наблюдается превосходное

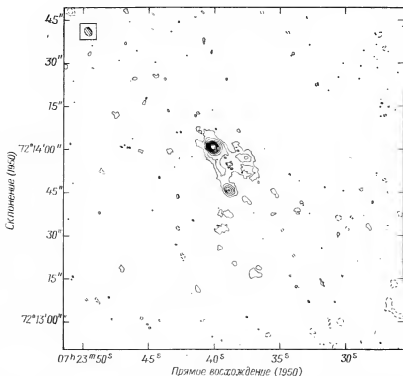


Рис. 21. Радионизображение нерегулярной «комковатой» галактики Маркарян 8, полученное с помощью VLA на волне 6 см (4885 МГц). Интервал между контурами соответствует 10 % максимальной интенсивности, равной 1,5 мЯн на размер диаграммы направленности (Хишен, Хейдемани, Инн, готовится к печати).

совпадение структур оптического и радиоизлучения. Пока неизвестно, является ли излучение галактики Маркарян 8 тепловым. Для ответа на этот вопрос предполагается провести наблюдения на длинах волн 20 и 2 см с разрешением, сравнимым с достигнутым на волне 6 см.

Детальное изучение объектов типа показанных на рис. 17—21 еще только начинается. В общем наблюдаемые потоки слабы и изучаемые области невелики по размерам. Для получения количественных данных для большого числа объектов лишь VLA обладает достаточным разрешением и чувствительностью. Комбинация наблюдений VLA с ультрафиолетовыми, рентгеновскими, оптическими и инфракрасными данными будет спо-

способствовать более глубокому пониманию проблем звездообразования и эволюции галактик.

Статистика и космология. Если не считать приведенного выше примера изучения выборки квазаров, основанной на оптических данных, VLA еще не использовался для статистических и других исследований, требующих полной реализации его чувствительности и разрешающей способности. Подобные наблюдения на уровне потока 0,1 мЯн и разрешения 1", например изучение распределения источников по размерам или по уровням потока, вполне реальны. Получаемые при этом данные о структуре, распределении, светимости и эволюции источников будут иметь большой интерес для космологии. Возможны и другие направления исследований, требующих полной мощности VLA. Правда, накопление достаточного объема данных наблюдений даже при высокой эффективности VLA потребует немалого времени. Наблюдения на уровне 0,1 мЯн могут послужить для изучения новых и до сих пор недоступных областей Вселенной. Разумеется, невозможно предугадать, какие открытия ждут нас на этом пути.

6. Заключение

Многоэлементный телескоп VLA должен послужить мощным орудием развития астрономии в восьмидесятые и последующие годы. Это общенациональный телескоп, доступный любому квалифицированному ученому с интересной программой независимо от его ведомственной принадлежности. Инструмент уже используется более чем 200 астрономами из 50 учреждений. Число заявок в настоящее время примерно в пять раз превышает возможности инструмента, так что можно реализовать лишь небольшую часть предложенных программ. Для дальнейшей информации относительно использования VLA следует писать директору НРАО, Шарлоттенсвилл. Вирджиния 22901, США.

Проектирование и создание VLA потребовало незаурядных способностей и совместных усилий многих специалистов. Большой вклад в создание VLA внесли научные сотрудники, инженеры, техники и администраторы НРАО, а также многих других учреждений. К сожалению, всех их перечислить невозможно.

Я с удовольствием выражаю признательность лицам, предоставившим мне материалы, используемые в этой статье: Б. Балику, К. Бигнеллу, Дж. Бернсу, Дж. Кондону, Э. Фомалону, А. Гашику, Р. Хьеллмингу, У. Джаффе, К. Джонстону, Ф. Оуэну, М. Шнепсу, А. Томпсону, К. Уэйду, С. Уэйнребу, А. Уилсону и Г. Зирину.

Литература

1. Abbott D. C., Biegling J. H., Churchwell E., Cassinelli J. P. *Astrophys. J.* 238, 196—202, 1980.
2. Balick B., Heckmann T. *Astronomy & Astrophys.* In press.
3. Barlow M. J. *Proc. IAU Symp.* 83, 119—30, 1979.
4. Beckett P. H. Department of Sociology and Anthropology, Rep. 357, Las Cruces, New Mexico State Univ., 307, pp. 1980.
5. Burns J. O. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* In press, 1980.
6. Burns J. O., Owen F. N. *Astron. J.*, 85, 214, 1980.
7. Burns J. O., White R. A., Hough D. H. *Astron. J.*, 86, 1—15, 1980.
8. Chow Y. L. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 20, 30—35, 1972.
9. Christiansen W. N. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 1, 1—18, 1963.
10. Condon J. J. *Astrophys. J.*, 242, 894—902, 1980.
11. Condon J. J., O'Dell S. L., Purshell J. J., Stein W. A. *Nature*, 283, 357—358, 1980.
12. Fomalont E. B. In: *Image Formation from Coherence Functions of Astronomy*, IAU Colloq. 49, 3—17, 1979.
13. Fomalont E. B. *Proc. IAU Symp.* 94. In press, 1980.
14. Gustincic J. J., Napier P. J. *Proc. IEEE Symp. on Antennas and Propagation*, p. 364, Stanford, 1977.
15. Hjellming R. M. *An Introduction to the Very Large Array*, Socorro, National Radio Astronomy Observatory, pp. 369, 1978.
16. Ho P. T. P., Haschik A. D., Israel F. P. *Astrophys. J.*, 243, 526—538, 1981.
17. Högbom J. A., Brow W. N. *Astron. Astrophys.*, 33, 289—301, 1974.
18. Kriss G. A., Canizares C. R., McClintock J. E., Feigelson E. D. *Astrophys. J.*, 235, L61—L65, 1980.
19. Kundu M. R., Velusamy T. *Astrophys. J.*, 240, L63—L68, 1980.
20. Marsh K. A., Hurford G. J. *Astrophys. J.*, 240, L111—L114, 1980.
21. McCready L. L., Pawsey J. L., Payne-Scott R. *Proc. Roy. Soc. London Ser. A.*, 190, 357—375, 1947.
22. National Academy of Sciences. *Ground-Based Astronomy, A Ten year Program*. Washington D. C. National Academy of Sciences—National Research Council, 105 pp., 1964.
23. National Academy of Sciences. *Astronomy and Astrophysics for the 1970's*, Vol. 1. Washington, D. C., National Academy of Sciences, 1972.
24. National Radio Astronomy observatory. *The VLA. A Proposal for a Very Large Array Radio Telescope*, Vol. I, II. Green Bank: National Radio Astronomy Observatory, 361 pp., 1967.
25. National Radio Astronomy Observatory. *The VLA. A proposal for a Very Large Array Radio Telescope*, Vol. III. Green Bank: National Radio Astronomy Observatory, 117 pp., 1969.
26. National Radio Astronomy Observatory. *The VLA. A Proposal for a Very Large Array Radio Telescope*, Vol. IV. Green Bank: National Radio Astronomy Observatory, 184 pp., 1977.
27. National Science Foundation. *Astrophys. J.*, 134, 917—39, 1961.
28. National Science Foundation. *Report of the ad hoc Advisory Panel for Large Radio Astronomy Facilities*. Washington, D. C. National Science Foundation, 19 pp., 1967.
29. National Science Foundation. *Report of the II Meeting of ad hoc Advisory Panel for Large Radio Astronomy Facilities*. Washington, D. C. National Science Foundation, 23 pp., 1969.
30. National Science Foundation. *Report of the ad hoc Advisory Panel for the Very Large Array (VLA)*. Washington, D. C. National Science Foundation, 25 pp., 1977.
31. Owen F. N., Burns J. O., Rudnick L. *Astrophys. J.*, 226, L119—L123, 1978.

32. Owen F. N., Hardee P. E., Bignell R. C. *Astrophys. J.*, 239, L11—L15, 1980.
33. Ryle M., Hewish A. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 120, 220—230, 1960.
34. Ryle M., Windram M. D. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 138, 1—21, 1968.
35. Ryle M. *Nature*, 239, 435—438, 1972.
36. Schneps M. H., Haschik A. D., Wright E. L., Barret A. H. *Astrophys. J.*, 243, 184—196, 1981.
37. Stanford research Institute. VLA Feasibility Study, ed. R. I. Presnell, Parts 1—3, Menlo Park, California, Stanford Research Institute, 156 pp., 1972.
38. Thompson A. R., Clark B. G., Wade C. M., Napier P. J. *Astrophys. J. Supp.*, 44, 151—67, 1980.
39. Weinreb S., Balister M., Maas S., Napier P. J. *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, 25, 243—248, 1977.
40. Williams W. F. *Microwave J.*, 8(7), 79—87, 1965.

МНОГОЗЕРКАЛЬНЫЙ ТЕЛЕСКОП

*Дж. М. Беккерс¹, Б. Л. Улих¹, Р. Р. Шэннон², Н. П. Карлтон³,
Дж. К. Гири³, Д. У. Латам³, Дж. Р. П. Эйнджел⁴,
У. Ф. Хоффман⁴, Ф. Дж. Лоу⁴, Р. Дж. Вейманн⁴,
Н. Дж. Вульф⁴*

1. Введение

Многозеркальный телескоп (МЗТ) был торжественно открыт 9 мая 1979 г. В настоящее время завершены сборка и настройка МЗТ, если не считать системы автоматической юстировки шести телескопов, которую еще предстоит довести до конца. Наблюдатель может легко сводить шесть оптических пучков вручную, поэтому основная астрономическая программа наблюдений идет на МЗТ с момента его ввода в строй.

МЗТ был задуман в конце 60-х годов, когда ученые Смитсоновской астрофизической обсерватории и Аризонского университета приняли решение о постройке шести параллельных каскадных телескопов из шести имеющихся в наличии «сотых» 1,8-м зеркал, причем шесть изображений должны были сводиться в одно специальным устройством объединения пучков. Таким образом, получается как бы телескоп, эквивалентный по суммарной светособирающей площади одному зеркалу диаметром 4,5 м. В этом смысле он оказывается третьим по счету среди крупнейших телескопов мира. Именно потребность в столь большой площади заставила принять окончательное решение о постройке МЗТ. Телескоп рассчитан как для оптических, так и для инфракрасных наблюдений слабых и малоконтрастных объектов. Вдобавок большое расстояние между краями главных зеркал дает возможность получать изображения в оптическом и ИК-диапазонах с очень высоким разрешением, если воспользоваться, например, интерферометром Майкельсона или спекл-интерферометром.

МЗТ находится на вершине Маунт-Хопкинс в Аризоне (долгота $110^{\circ} 53'04,4''$, широта $31^{\circ}41'19,6''$) на высоте 2600 м. Это место было выбрано потому, что оно находится в Тусоне, где сосредоточено немало астрономических учреждений, имеет хорошее качество изображения и годится для фотометрии. Достаточная высота обеспечивает сухость воздуха и сравни-

¹ Multiple Mirror Telescope Observatory, Tucson, Arizona 85711, USA.

² Optical Sciences Center, Tucson, Arizona 85721, USA.

³ Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, Massachusetts 02138, USA.

⁴ Steward Observatory, Tucson, Arizona 85721, USA.

тельно темное небо, а число ясных ночей там велико. На рис. 1 показан общий вид обсерватории Маунт-Хопкинс. Телескоп расположен на небольшой плоской вершине довольно крутого горного пика, так что он как бы поднят высоко над окрестностями. Нам кажется, что такое расположение наряду с удачной конструкцией башни и самого телескопа является причиной очень хорошего качества получаемых на МЗТ изображений. По небольшому наблюдательному материалу, накопленному до сих пор, среднее качество изображения составляет около $1''$ (диаметр турбулентного диска по уровню $0,5 - D_{0,5}$), причем достаточно часто регистрируются изображения в $0,5''$.

На рис. 2 показан сам телескоп с близкого расстояния. Он имеет альтазимутальную монтировку, которая управляется ЭВМ и способна сопровождать объекты, перемещающиеся как со скоростью суточного движения, так и с другими скоростями. В осях телескопа вместо обычных гидростатических подшипников применяются шариковые. Оси приводятся в движение пусковыми моторами и редукторами с цилиндрическими шестернями, а не традиционными червячными передачами. На альтазимутальной монтировке покоится конструкция, несущая оптику (КНО). Она проектировалась так, чтобы создать необходимую жесткость при наименьших затратах и весе, и включает в себе шесть 1,8-м кассегреновских телескопов, оптику для объединения пучков и 76-см кассегреновский телескоп для гидирования и юстировки. Телескоп и монтировка находятся в башне, вращающейся вместе с ними по азимуту. Кроме телескопа в башне помещаются пульт управления, комнаты для сбора и анализа данных, мастерские, конференц-зал и кабинеты.

Ход лучей в МЗТ показан на рис. 3. Каждый кассегреновский телескоп имеет главное зеркало диаметром 1,8 м и светосилой $1:2,72$. Вторичное зеркало преобразует светосилу пучка к $1:31,6$. Затем после отражений от третьего плоского зеркала и объединителя пучков свет попадает в квазикассегреновский фокус МЗТ, расположенный на оси КНО. В нем масштаб изображения составляет $3,6''/\text{мм}$. «Окончательная» светосила МЗТ определяется конической огибающей шести сходящихся пучков и зависит от крутизны граней объединителя. Угол этого конуса и размер свободного от виньетирования поля зрения МЗТ взаимосвязаны. Для существующего объединителя $1:9$ поле зрения составляет $52''$. Впрочем, виньетирование нарастает медленно, и «полезное» поле зрения МЗТ (экранирование $< 50\%$) равно $4'$. Более светосильный объединитель будет обладать большим полем за счет снижения степени заполнения светового конуса и некоторого ухудшения изображения вследствие возросших наклонов фокальных плоскостей. Поляризационные эффекты при отражении от наклонных диагональных зеркал и объединителя

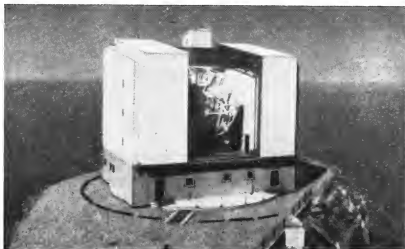


Рис. 1. Многозеркальный телескоп расположен на плоском срезе вершины Маунт-Хопкинс. Вид с востока. Показана небольшая ровная площадка вокруг телескопа, окруженная крутыми склонами. Высота башни 16,8 м, ширина 19,5 м, глубина 13,4 м.

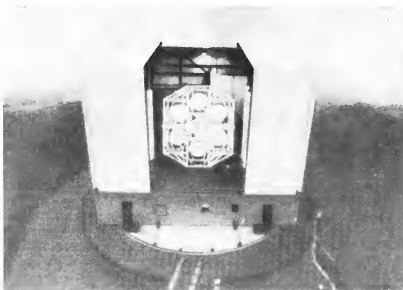


Рис. 2. Шесть главных зеркал МЗТ и седьмое зеркало телескопа для юстировки и гидрирования укреплены в открытой трубчатой несущей конструкции на альтазимутальной монтировке. Башня поворачивается вместе с телескопом.

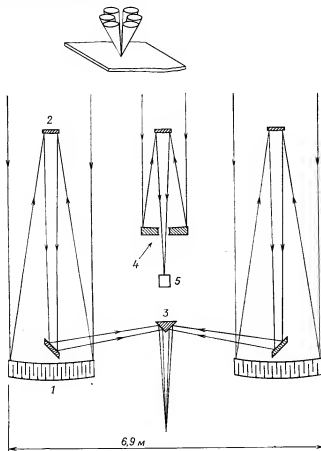


Рис. 3. Ход лучей в двух противоположных основных телескопах и телескопе для гидрирования и юстировки. Вверху показано угловое заполнение пучка в квазикассегреновском фокусе. 1 — главное зеркало диаметром 1,8 м; 2 — вторичное зеркало; 3 — объединитель пучков; 4 — телескоп для гидрирования и юстировки диаметром 0,76 м; 5 — приемник автогида.

делают МЗТ в его настоящем виде непригодным для поляриметрии, а интерферометрия дает хорошие результаты только при использовании пары диаметрально противоположных зеркал.

Во многих отношениях МЗТ сильно отходит от традиционной технологии телескопостроения. Хотя такое отступление сначала могло показаться рискованным, оно привело к созданию сравнительно дешевого инструмента и новой технологии, которая, несомненно, изменит способы постройки телескопов будущего.

Вот наиболее значительные отличия МЗТ от обычной технологии оптического телескопостроения: а) Применение облегченных «сотовых» зеркал, повлекшее существенное снижение веса телескопа. б) Использование альтазимутальной монтировки, упростившее реакцию конструкции на силу тяжести, что также привело к экономии средств. Разумеется, альтазимутальные монтировки применялись и раньше, например в советском 6-м телескопе и в радиотелескопах. Однако монтировка МЗТ отличается высокой скоростью и точностью сопровождения. в) Применение более экономичных и простых в эксплуатации шарикоподшипников вместо гидравлических. г) Приводы с цилиндрическими шестернями вместо червячных. д) Одно монолитное зеркало заменено несколькими одинаково ориентированными светосборниками. Опыт МЗТ показал жизнеспособность всех этих новых идей, хотя, как и во всех новых телескопах, осталось еще много работы по инженерной доводке. Наблюдения на МЗТ начались в 1979 г., и теперь телескоп уже зарекомендовал себя как хороший астрономический инструмент, приносящий построившим его организациям серьезные научные результаты.

МЗТ был построен совместными усилиями Смитсоновского института и Аризонского университета, зафиксировавшими свое соглашение в подписанном 23 декабря 1973 г. меморандуме. Обе организации предоставили для строительства телескопа сотрудников и средства. Национальный научный фонд финансировал отдельные разработки, связанные со строительством телескопа и приборов к нему. После открытия МЗТ в мае 1979 г. две организации подписали 1 июля 1979 г. новый меморандум, согласно которому для работы МЗТ была создана обсерватория МЗТ (ОМЗТ). Обсерватория призвана обеспечивать работу и обслуживание МЗТ и завершать незаконченные технические разработки.

В штате обсерватории около 20 сотрудников: инженеров, техников, операторов и административных работников, ее годовой бюджет составляет примерно 1 млн. долл. и делится поровну между обеими организациями-руководителями, причем часть своей доли Аризонский университет выплачивает с помощью Национального научного фонда. Главная нерешенная техническая проблема связана с автоматической взаимной юстировкой шести телескопов. Сейчас можно с успехом совместить оптические оси телескопов вручную с точностью до долей секунды дуги. Автоматическая лазерная система юстировки может поддерживать ее со среднеквадратичной ошибкой 1". Этого не достаточно, особенно если учесть часто встречающееся на Маунт-Хопкинс исключительно хорошее качество изображения, когда требуется сохранять юстировку с точностью до долей турбулентного диска диаметром 0,5". Непрерывно совершенст-

вуются как методы юстировки по самим изображениям звезд, так и лазерная юстировка.

Эти и другие инженерные работы идут параллельно с солидной наблюдательной программой. До 75 % ясных ночей ежемесячно используется для астрономических наблюдений. МЗТ — достаточно сложный инструмент, поэтому для управления им и помощи наблюдателю нужны штатные операторы. Телескоп особенно хорошо приспособлен для получения спектров и изображений слабых небесных объектов, для спектроскопии с высоким разрешением, для инфракрасных наблюдений, для точной фотометрии слабых источников, для оптической и ИК-интерферометрии. В разд. 7 этой главы, написанном Р. Вейманном, подробно рассказано о научных задачах, которые решаются или будут решаться на МЗТ. В других разделах, авторы которых указаны ниже, речь идет об истории МЗТ (разд. 2 — Беккерс, 3 — Вульф, 4 — Вейманн), проекте и качестве работы МЗТ (разд. 5: 5.1—5.3 — Карлтон, 5.4 — Шэннон, Беккерс, 5.5 — Хоффман, 5.6 и 5.7 — Лоу, 5.8 — Улих, 5.9 — Карлтон, Беккерс), научных приборах (разд. 6: 6.1 — Беккерс, 6.2 — Эйнджел, Латам, 6.3 — Лоу, 6.4 — Гири) и идеях относительно будущих телескопов с составными объективами (разд. 8 — Вульф).

2. Прежние телескопы с составными объективами

История астрономических телескопов в значительной степени является историей изготовления все более и более крупных объективов для них. В прошлом размер телескопов определялся прежде всего способностью создавать более крупные линзы и зеркала. Астрономы всегда хотели иметь телескопы со все большей светособирающей площадью, чтобы исследовать все более и более слабые объекты. Поэтому мысль о сложении световых потоков от нескольких небольших объективов с целью достичь яркости изображения, как в более крупном телескопе, вероятно, появлялась у многих. В астрономической литературе имеются работы, посвященные проектам и реализации таких телескопов с составными объективами. Некоторые из них уже отражены в обзорах [30, 31, 16].

В табл. 1 собраны сведения о работах, описывающих реально созданные и испытанные инструменты. Некоторые из них представляют собой набор одиночных зеркальных сегментов, образующих в совокупности один объектив, строящий одно изображение (тип А). В других, как в МЗТ, получают сначала отдельные изображения, которые затем складывают с помощью перебрасывающей оптики или электронным путем (тип Б). В табл. 1 не включены многоапертурные приборы, предназна-

ченные только для интерферометрических работ. В указанном направлении намного дальше других продвинулся директор обсерватории в Болонье (Италия) Гюндо Хорн д'Артуро, который с 1932 по 1953 г. вел строительство так называемого «мозаичного зеркала», прерванное на время второй мировой войны. Он построил направленный в зенит неподвижный телескоп диаметром 1,8 м с ограниченной возможностью сопровождения небесных объектов за счет движения фотопластины. Хорн д'Артуро предлагал установить несколько таких зенитных телескопов с полем по 80' вдоль меридиана на расстоянии 150 км друг от друга, чтобы изучать больший участок неба. Он считал свое мозаичное, или сегментированное, зеркало прототипом гораздо более крупных телескопов диаметром 13—18 м. Хотя намечалось, что эти более крупные зеркала будут неподвижными, предлагалось увеличить полноту обзора неба с помощью сложной подвижной оптической системы в главном фокусе [27].

В табл. 2 собрана литература по проектам телескопов с составными объективами. Хотя современные проекты телескопов с составными объективами привлекли большое внимание, любопытно изучить некоторые публикации, появившиеся до МЗТ. Особенно интересна работа Синджа [59], представляющая собой, по-видимому, первое описание устройства, подобного МЗТ (тип Б). Высказанные там идеи относительно оптики и ее крепления в действительности столь сильно напоминают МЗТ, что этот телескоп может считаться осуществлением проекта Синджа, несмотря на то что он был разработан независимо. В работе указано также на преимущества подобного телескопа по весу, а значит, и стоимости: «... вес такого телескопа должен расти пропорционально квадрату диаметра эквивалентной апертуры, в то время как у обычных телескопов он пропорционален кубу диаметра». Интересны также работы [12, 13], где описана оптическая схема, которая теперь действительно применяется для соединения МЗТ со своим спектрографом (см. разд. 6.2). Расположив звездные изображения, сформированные многозеркальной системой, вдоль щели спектрографа и согласовав направления осей всех падающих пучков света при помощи набора призмочек, можно без потерь света соединить крупный 4,5-м телескоп со спектрографом с более высоким спектральным разрешением, соответствующим 1,8-м телескопу.

Большинство проектов, представленных в табл. 2, предложены совсем недавно. Системы с составными объективами используются почти во всех концепциях крупных телескопов будущего, и не только потому, что возможности изготовления ограничивают размер зеркал, но и потому, что составная апертура меньше весит и дешевле обходится. Можно думать, что объемы таблиц, подобных 1 и 2, будут быстро увеличиваться.

Таблица 1

Источник	Тип ¹	Вид объектива	Диаметр элемента, см	Число объективов	Общая площадь, см ²	Примечания
Оксмантаун, 1828 [49]	A	Зеркало	~10	2	180	Ставилась задача устранить сферическую аберрацию, а не увеличить размер
Хори д'Артуро, 1935 [24]	A	"	10	20	2 160	Направлен в зенит, сопровождение за счет движения фотоластинки
Везала, 1948 [62]	A	"	32	7	5 600	
Хори д'Артуро, 1950, 1953, 1955, 1956 [25—29]	A	"	20	61	22 000	Направлен в зенит, сопровождение за счет движения фотоластинки. В работе 1955 г. есть рисунки 13- и 18-м зеркал Л. Т. Джонсона
Хенбери Браун, 1964 [19]	A	"	—	252	300 000	Угловое разрешение всего 6'
Берк и др., 1968 [5]	A	"	60	248	780 000	Угловое разрешение всего 0,5°
Фоллер, 1978 [11]	B	Линза	19	80	23 000	Разрешение и поле зрения около 3"
Басов и др., 1979 [3]	A	Зеркало	40	7	11 000	
Грейнер, 1979 [15]	B	"	38	7	8 000	
МЭТ (Карлтон и Хоффман, 1978 [7])	B	"	180	6	150 000	

¹ Тип А — телескоп с сегментированным зеркалом, изображения наложены в главном фокусе.

Тип В — система из нескольких телескопов, изображения складываются с помощью переобращающей оптики.

Таблица 2

Источник	Тип	Вид объектива	Диаметр элемента, см	Число объективов	Общая площадь, см ²	Примечания
Фотеску, Хейлбран, 1909 [14]	Б	Линза				Пат. США № 21456
Сниддж, 1930 [59]	Б	Зеркало				Оптика и конструкция очень похожи на МЗТ. Указано на экономичность такого телескопа, так как вес пропорционален квадрату диаметра, а не кубу его, как в обычных телескопах
Фаст, 1961, 1967 [12—13]	А/Б	"		7		Указано на повышение эффективности спектрографа в многозеркальных системах при помощи такой же системы, как в спектрографе МЗТ
Томас, 1965 [60]	Б	"				Пат. США № 3507457
Мейнел, 1970 [41]	Б	"				Исследование сфазированного МЗТ
Мерц, 1970, 1980 [45—46]	А	"				Чаша типа радиотелескопа в Аресибо

Источник	Тип	Вид объектива	Диаметр элемента, см	число объективов	Общая площадь, см ²	Примечания
Холл, 1978 [18] Барр, 1980 [2]	A/B	Зеркало			4 900 000	Различные варианты 25-м телескопа следующего поколения (ТСП)
Ричардсон и Грандмен, 1978; Грандмен и Ричардсон, 1980 [17, 52]	Б	"	300	69	4 900 000	Аналогичное исследование, варианты из двух телескопов по 1,8-м; 178 по 1,9-м; 25 по 1,5 м и 6 по 3 м
Лернер, 1978 [35]	Б	"				Описаны 3 системы из отдельных небольших телескопов, аналогичные ТСП типа «системы одиночных телескопов»
Мейнел, 1978 [42]	A/B	"				Изучен неподвижный телескоп, питаемый сидеростатами
Мейнел, 1979 [43]	Б	"				Обсуждаются различные варианты МЗТ
Стещенко, 1979 [57]	А	"			4 900 000	Советский проект 25-м телескопа
Нельсон, 1980 [47]	А	"	140	60	780 000	
Мейнел, Мейнел, 1980 [44]	А	"		36	780 000	
Вульф, Эйджел, 1980 [66]	Б	"	500	8	1 570 000	

3. Первые этапы проекта МЗТ

После пионерских работ Синджа и Хорн д'Артуро о двух типах телескопов с составными объективами наступило затишье. В это время продолжалось развитие техники, в результате чего появилась возможность строить точные телескопы такого рода. Стимулом к возрождению проекта МЗТ стала попытка П. Конна создать крупный телескоп типа А.

В конце 60-х годов Ф. Лоу из Лунно-планетной лаборатории (ЛПЛ) Аризонского университета разработал методы регистрации слабых объектов в диапазоне 10 мкм на 1,5-м телескопе. Он считал, что его успех отчасти объясняется использованием апертуры умеренных размеров, и искал способы дальнейшего повышения чувствительности. После поездки на телескоп Конна в 1967 г. он пришел к выводу, что, несмотря на недостатки этого проекта, связанные с температурными эффектами, общая идея сложения зеркал заслуживает внимания, и в принципе можно работать на нескольких 1,5-м телескопах с общим фокусом. Тогда же по возвращении в США в 1968 г. он обсуждал эту возможность с Аденом Мейнелом из Оптического центра Аризонского университета. Мейнела интересовало повышение светособирающей площади и разрешающей способности телескопов, предназначенных для наблюдений земной поверхности из космоса. Рассмотрев несколько вариантов сложения световых пучков, Мейнел детально рассчитал оптическую систему типа Б. Он также предложил способы получения сфазированного поля в таком телескопе с помощью призм [41].

Об идее МЗТ Лоу доложил на конференции в Пасадене 28 июля 1969 г. Через 6 мес он сделал аналогичное сообщение на секции ИК-наблюдений Национальной академии наук США, изучавшей перспективы американской астрономии на 70-е годы. В этот же период ЛПЛ посетил Роберт Нойес из Смитсоновской астрофизической обсерватории (САО).

В середине 60-х годов во время строительства Смитсоновской астрофизической обсерватории на Маунт-Хопкинс вершину горы оставили свободной для установки там большого телескопа. Когда проектные и большая часть строительных работ по 1,5-м телескопу остались позади, задумались о строительстве большого и не слишком дорогого телескопа на вершине. Ф. Уиппл организовал группу из трех человек: Н. Карлтона, Л. Мерца и Т. Хоффмана. Ими было изучено несколько схем, каждая из которых была не лишена недостатков. Предпочтение отдавалось чаще типа радиотелескопа в Аресибо, сделанной в виде мозаики из отдельных элементов [45]. Жерар Койпер из ЛПЛ в телефонном разговоре с Уипплом напомнил о разработке идеи МЗТ. Мейнел сообщил Уипплу о возможности

получить несколько лишних облегченных заготовок для зеркал у ВВС США, поэтому были начаты исследования в нескольких направлениях с целью подготовки такого объединенного проекта.

Смитсонианская группа взялась за детальное изучение идеи МЗТ, чтобы отыскать в ней скрытые недостатки. Р. Веймани из обсерватории Стьюард склонил Оптическую секцию Национальной академии наук, членом которой он являлся, поддержать проект. Были проделаны первые исследования механического крепления оптических деталей. Выяснилось, что первоначальный вариант механической системы телескопа, хотя и годится, быть может, для космоса, имеет слишком большие прогибы, и поддерживать наложение фокусов будет нелегко. Тогда-то Веймани и М. Рид предложили схему лазерной юстировки.

Однако, когда дело дошло до выбора места для телескопа, весь объединенный проект чуть было не рухнул. Одни отдавали предпочтение Маунт-Хопкинс, другие — Маунт-Леммон. Более высокая вершина Маунт-Леммон лучше подходит для инфракрасных наблюдений, зато в оптическом диапазоне лучше Маунт-Хопкинс, там меньше яркость неба. Поддержка Мейнела решила спор в пользу Маунт-Хопкинс, хотя даже после начала прокладки дороги точное место установки будущего телескопа оставалось неопределенным.

4. Вспоминает Р. Дж. Веймани

В приводимых ниже личных воспоминаниях о некоторых событиях и решениях относительно постройки МЗТ, имевших место в те годы, когда я был тесно связан с проектом, я не могу поручиться за точность деталей и хронологию: многих документов уже не существует, а многие высказывания, к счастью, не были записаны. Полагают все же, что существо дела я излагаю правильно.

В течение некоторого времени группа ученых из Лунно-планетной лаборатории (прежде всего Ж. П. Койпер и Ф. Дж. Лоу, а также Г. Л. Джонсон) беседовала с А. Б. Мейнелом, работавшим тогда в Оптическом центре Аризонского университета, о постройке крупного телескопа типа МЗТ на Маунт-Леммон. Наличие нескольких облегченных 1,8-м заготовок сделало эту возможность реальной. В тот период группа из ЛПЛ считала, что это будет прежде всего инфракрасный телескоп. Койпер был особенно заинтересован в применении его для ИК-спектроскопии при помощи разрабатывавшихся тогда фурье-спектрометров.

Мое первое «официальное» знакомство с проектом состоялось после конференции по кометам в апреле 1970 г., когда Ф. Лоу, Ж. Койпер и Ф. Уинпл рассказали мне о своих идеях.

Сам Уиппл занимал пост директора Смитсоновской астрофизической обсерватории и принял предложение объединить усилия САО и ЛПЛ, поскольку он вместе с несколькими коллегами из САО интересовался вариантами постройки дешевого крупного телескопа. Будучи директором обсерватории Стюард, я решил, что такой инструмент перспективен также с точки зрения оптической спектроскопии и вообще задач оптической астрономии, допускающих малое поле зрения. Более того, если Аризонский университет действительно хотел стать одним из ведущих астрономических учреждений страны, то его участие в проекте МЗТ представляло собой редкую возможность, которая больше, наверное, не представилась бы. К счастью, руководство университета разделило эту точку зрения, и вскоре обсерватория Стюард стала участником проекта.

В это время Национальной академией наук был создан Консультативный комитет во главе с Дж. Л. Гринстейном, и в его Оптической секции, членом которой я состоял, составляли список первоочередных задач. На одном из первых заседаний в Пасадене первоочередным оптическим проектом назвали строительство копии 5-м телескопа Хэйла в южном полушарии. Это меня обеспокоило. Во-первых, если уж быть откровенным, это сделало бы богатых еще богаче, поскольку инструментом должна была руководить пасаденская группа¹. Тем самым было бы подавлено нормальное соперничество, которое часто считают очень желательным для прогресса науки — особенно те, кому затруднен доступ к первоклассным инструментам. Гораздо важнее, однако, что предложение такого проекта на грядущее десятилетие казалось малоперспективным. В сжатом виде эту мысль выразил секретарь комитета Брюс Грегори: «Как же будет смотреться дубликат инструмента, задуманного и спроектированного в 30-е годы, по сравнению с проектами радиоастрономов такого масштаба, как система VLA?» Учитывая это, секции пришлось заслушать доклад Адена Мейнела об идее постройки МЗТ, а также доклад Дика Миллера по оптической интерферометрии. Окончательным результатом раздумий явилось включение в отчет Оптической секции и всего комитета рекомендации построить модель МЗТ и изучить пригодность идеи для создания более крупного 10—15-м инструмента.

Мейнел сделал вдохновенный и эффективный доклад но, к сожалению, оставил у присутствовавших на нем представителей Национального научного фонда четкое впечатление о том, что финансовая помощь министерства обороны практически

¹ Имеется в виду объединенная обсерватория Маунт-Вилсон/Паломар в Пасадене, располагающая 5-метровым телескопом.— *Прим. перев.*

гарантирована и от них почти ничего не потребуются. Это мнение в течение нескольких лет было для нас настоящим бедствием. Тем временем принимается несколько ключевых решений относительно телескопа и вырисовывается примерное разделение обязанностей. В числе первых было принято решение делать светосильные главные зеркала 1:2,7, а не длиннофокусные. Сторонники проекта 1:2,7 заявляли (думаю, правильно), что преимущества иметь очень компактную, почти «квадратную» конструкцию телескопа перевешивают возрастающие трудности ретуши зеркал и неизбежную необходимость изогнуть имевшиеся заготовки, связанную с риском их испортить.

Больше всего разногласий было по вопросу выбора места для телескопа. Койпер и Лоу из ЛПЛ ратовали за Маунт-Леммон: эта вершина была доступна и обжита, что удешевляло строительство, и немного выше, чем Маунт-Хопкинс, что давало незначительные преимущества для ИК-наблюдений. Разумеется, в САО предпочитали Маунт-Хопкинс, ибо там уже была их обсерватория. Я тоже выступал за Маунт-Хопкинс, и не только потому, что меня беспокоило влияние яркости неба на оптические наблюдения, но и потому, что обстоятельства требовали серьезной финансовой помощи со стороны САО, на которую вряд ли можно было рассчитывать в случае выбора вершины Маунт-Леммон. Данную точку зрения разделял и Мейнел. Таким образом, решение в пользу Маунт-Хопкинс пришлось очень не по душе группе ЛПЛ, и в течение нескольких последующих лет их энтузиазм к проекту сильно угас.

Разделение обязанностей по проектированию и строительству телескопа никогда не вызывало серьезных споров: сотрудники САО, в особенности Н. Карлтон и Т. Хоффман, обладали значительным опытом и заинтересованностью в вопросах, касающихся башни и монтировки, в то время как Аризонский университет благодаря наличию Оптического центра стал отвечать за оптику. Мейнел назначил М. Рида, выпускника Аризонского университета, специализировавшегося по электронике, руководителем работ по системе юстировки. Единственным «белым пятном» оставалась поначалу конструкция, несущая оптику, т. е. «труба», однако по финансовым и инженерным соображениям за эту часть проекта стала отвечать САО. Формальное соглашение, обязывающее обе организации принять активное участие в строительстве телескопа и определяющее основные принципы, в том числе равный доступ к инструменту, было подписано 23 декабря 1975 г. В Аризоне не нашлось человека, который мог бы возглавить проект и следить за той его частью, которую курировал Аризонский университет, и после обсуждения нескольких кандидатур выбрали У. Ф. Хоффмана, работавшего тогда в НАСА. Он принял этот пост и начал

работу в начале 1973 г. Вместе с Н. Карлтоном ему пришлось ежедневно контролировать и координировать действия Аризонского университета и САО.

Вслед за этим принимается еще одно важное проектное решение: учитывая различные инженерные ограничения и возможности, предоставляемые компактностью конструкции и малой «зоной обметания» трубы на альтазимутальной монтировке (экваториальная монтировка никогда всерьез не рассматривалась), Т. Хоффман и Н. Карлтон предложили полностью отказаться от традиционного купола и приблизить башню вплотную к телескопу. Предлагалось заключить телескоп в небольшую коробку («сарай»), вращающуюся целиком на уровне земли. Сначала эта идея встретила резкое сопротивление, отчасти из-за ограничения доступа к телескопу, а также по причинам, которые теперь кажутся совершенно не относящимися к делу. Хотя было понятно, что очень открытая конструкция света бы к минимуму разность температуры воздуха внутри и снаружи, высказывалось опасение, что коробчатая конструкция и близость телескопа к земле могут ухудшить качество изображения. К счастью, на сегодняшний день одной из приятных неожиданностей МЗТ является высокая частота появления отличных изображений.

Трудности с финансированием телескопа не прекращались. Несмотря на доклад Гринстейна, в Национальном научном фонде отрицательно относились к покрытию затрат Аризонского университета на МЗТ. Это вызывалось как сложностью финансирования через несколько организаций, так и длительным отсутствием взаимопонимания, трудностями и личными конфликтами между Смитсонианским институтом и САО, с одной стороны, и Национальным научным фондом — с другой. Сложилась анекдотическая ситуация: сначала было сказано, что требуется продемонстрировать преимущества проекта на небольшой модели, но потом этот подход стали критиковать, утверждая, что на самом деле необходимо было представить детальный проект МЗТ в натуральную величину! В 1971 г. САО доложила о своих планах в палате представителей и подкомитете внутренних дел конгресса и при поддержке делегации штата Аризона добилась выделения в 1972 финансовом году средств для финансирования своей части проекта.

Затем Аризонский университет стал искать поддержку у законодательного собрания штата. В тот же период рассматривался запрос о возможности дополнить законодательство округа Пима муниципальным постановлением об ограничении освещенности, и я имел по этому поводу беседы с сенатором Дугласом Холсклоу. Однажды он позвонил мне поздно вечером и, извиняясь, сообщил, что законопроект не собрал большинства

на предварительном обсуждении в сенате, и добавил, что, как правило, специальные законопроекты, смысл и все последствия которых не вполне ясны, обычно не проходят, даже если они не связаны с затратами. Это меня встревожило, ведь последствия ассигнования средств на МЗТ тоже могли быть не слишком понятны в сенате, а здесь-то уж точно речь шла о затратах. Отвечая на мой вопрос, сенатор Холсклоу признал, что с ассигнованиями на МЗТ дело тоже обстоит не очень хорошо, и дополнительная информация в самом деле могла бы быть кстати. Я собрал все материалы, которыми располагал, и отнес их на почту (в час ночи!). Закон о финансировании МЗТ был все-таки принят (вместе с законом об ограничении освещенности).

После этого события я впервые поверил в реальность постройки МЗТ или по меньшей мере участия в ней Аризонского университета, хотя финансирование продолжало оставаться и остается до сих пор весьма ограниченным. Несколько раз в Оптическом центре был перерасход средств, и М. Риду приходилось «срезать углы». В этой связи мне хотелось бы отметить вклад в проект Г. Сэнджера. На него возложили непосредственную ответственность за работу Оптического центра, когда он только что окончил университет и работал над диссертацией; позже его обязанности перешли к Р. Паркеру. Что бы там ни говорили о прогрессе оптики и бюджетных трудностях, оптика МЗТ действительно оказалась очень хорошей, и заслуга эта принадлежит им обоим, а также д-ру Р. Шэннону, который руководил проектом в Оптическом центре.

Проект в целом критиковали, утверждая, что не следовало начинать работу до достижения полной определенности с финансированием. На самом же деле, учитывая конкретную обстановку, сложившуюся вокруг МЗТ, можно сказать, что ожидание полного финансирования было бы равносильно отказу от проекта. Нас упрекали также в отсутствии в проекте одного руководителя, имеющего достаточную для принятия решений власть, вместо которого был создан большой и сложный административный аппарат. Говорили и говорят, что «нельзя построить телескоп с помощью комитета». В действительности в силу совместного характера программ, географического разделения двух групп и способа распределения обязанностей образование такого административного аппарата было в значительной степени неизбежно и, конечно, необходимо.

Я не утверждаю тем самым, что не было сделано ошибочных оценок и ошибок в подходе к проекту. Оглядываясь назад, я думаю, что мы не смогли достаточно четко отделить систему приводов вторичных зеркал от лазерной системы для автоматического сохранения юстировки. Вероятно, слишком мало внимания было уделено юстировке по звездам, отчасти из-за того,

что придавали слишком много значения возможности офсетно гидировать в полнолуние. Для этого, казалось, нужна была внутренняя система юстировки, если учесть малое поле зрения и уровень телевизионного гидирования в те годы. Некоторые вопросы вроде этого можно было бы решить лучше, если бы проект подвергся серьезной оценке коллег. В действительности несколько видных астрономов обсуждали проект 20 ноября 1975 г., но, наверное, лучше это было бы сделать раньше и более основательно.

Во всяком случае, критика «комитетчины» мне всегда казалась как-то ни к чему. В таком сложном проекте, как МЗТ, совершенно необходима группа преданных и компетентных лиц, которые могли бы тщательно проверять свои идеи и координировать свои действия, совещаясь с более широким кругом специалистов, объединенных известной долей взаимного доверия и сотрудничества. На мой взгляд, действительная опасность коллегиальной структуры заключается в том, что она может превратиться в место дебатов не о конкретных технических проблемах, а о престиже групп и входящих в них лиц.

Не знаю, какие из реализованных в МЗТ идей в конце концов найдут применение в крупном наземном телескопе будущего, который предлагался в докладе Гринстейна, а потом и в докладе Филда, но уверен, что постройка МЗТ была важным и полезным делом, которое принесет пользу не только астрономам из Аризонского университета и САО, пользующимся телескопом, но и всей астрономической общественности.

5. Устройство и качество работы МЗТ

5.1. Конструкция, несущая оптику

На проект механической системы определяющее влияние оказали основная оптическая схема МЗТ с шестью 1,8-м главными зеркалами и несколько важных идей, появившихся в самом начале из других соображений. В частности, стало ясно, что «шестистовальная» схема упрощает, вообще говоря, задачу проектировщиков, поскольку можно расположить основные несущие элементы между шестью телескопами. Опыт Мейнела в проектировании обычных телескопов привел к важному выводу, что отношение фокусных расстояний зеркал к диаметрам должно быть равно 2,7, хотя с более длинным фокусом, вероятно, удалось бы отшлифовать и отполировать заготовки в их первоначальном плоском виде. Доводом в пользу такого выбора явилось то, что экономия средств за счет более компактной конструкции телескопа, а следовательно, и купола превысит возросшую стоимость оптической ретуши. Детальных экономических расчетов не проводилось, так же как и при выборе

альтазимутальной монтировки. Здесь сыграло роль не столько сравнение стоимости монтаровок (альтазимутальная, очевидно, гораздо дешевле), сколько тот вывод, что трудности, связанные с вращением поля в альтазимутальной монтировке, вероятно, не так велики, чтобы оправдать лишние затраты на экваториальную монтировку. После принятия вначале всех этих решений проектировщикам, по сути дела, осталось разместить конструкцию между более чем 100 оптическими элементами основных телескопов и системы юстировки — гидирования с учетом навесных приборов весом до 2000 кг, соответствующей оптики для гидирования и т. п. В работах Хоффмана [22, 23] подробно описаны инженерные идеи, воплощенные в конструкции, несущей оптику, монтировке и башне.

Нам хотелось для простоты ограничиться активной коррекцией наклонов и фокусировки вторичных зеркал в каждом из телескопов. Разумеется, лучше было бы исправлять наклоны и смещение всех главных и вторичных зеркал, чтобы их оси всегда образовывали идеальную шестиугольную фигуру. Тем не менее достаточно и более простого варианта, если соблюдаются два условия: 1) разъюстировки каждого из отдельных кассегреновских телескопов из-за прогибов под действием силы тяжести и температуры должны быть настолько малы, чтобы абберации в изображении оставались в допустимых пределах, и 2) направление падающего пучка, наблюдаемого из фокуса, не должно меняться чересчур сильно, чтобы не вызывать в оптических системах навесных приборов таких дефектов, как, например, виньетирование.

Связь этих условий с прогибами отдельных элементов представляет собой сложную векторную задачу, но мы приведем основные результаты ее решения. Разъюстировка увеличит размер изображения не более чем на 0,2", если взаимные смещения главного и вторичного зеркал не превышают 0,7 мм, а угол между их оптическими осями не больше 2,5'. Эти смещения и наклоны сдвинут изображение в фокусе соответственно на 25 и 300". Если к тому же главные зеркала удерживаются в своих номинальных положениях с точностью до 2 мм, то направления пучков изменятся не более чем на 1% от их угловых диаметров.

Эти критерии определяли требуемую форму и жесткость несущей конструкции. Отсюда также следовал важный вывод о том, что различные элементы не должны сильно отличаться друг от друга по времени теплообмена, чтобы при ожидаемых переменах температуры в несколько градусов в час конструкция не изгибалась.

Еще одно важное ограничение на конструкцию определяется ее взаимодействием с двумя механическими сервосистемами:

приводами сопровождения и управления вторичными зеркалами. Для того, чтобы эти системы работали устойчиво, требуется, чтобы резонансные частоты тех мод, с которыми могут взаимодействовать сервосистемы, оставались намного выше требуемой верхней частоты обработки. Согласно расчету жесткости основных приводов по отношению к порывам ветра и другим возмущающим моментам, нужно было иметь резонансные частоты основных колебательных мод конструкции не менее 5 Гц. Остаточные ошибки от этих основных возмущений могут быть исправлены вторичными зеркалами при условии, что резонансные частоты их креплений выше 50 Гц. На самом деле резонансные частоты конструкции тесно связаны с ее прогибами под нагрузкой, и то обстоятельство, что данный проект удовлетворяет одинаково хорошо этим двум разным критериям, оказалось приятным совпадением.

Еще на первых этапах решено было применить конструкцию типа фермы, т. е. с тонкими длинными элементами, работающими в основном просто на сжатие и растяжение. Мы считали, что конструкции из больших цилиндров, пластин и т. д. хуже воспринимают множество локализованных нагрузок от оправ зеркал, приборов и т. п. Из рассмотренных материалов (сталь, алюминий, волокonné композиты) была выбрана сталь как наиболее экономичная.

Начиная с этого момента детальное проектирование конструкции, несущей оптику, потребовало большой изобретательности, особенно с учетом дополнительного ограничения применять всюду, где можно, только стандартные стальные профили, но задача была полностью решена, и даже с некоторым пространственным запасом. Одна из полезных особенностей проекта состоит в том, что точки крепления оправ главных зеркал находятся в стороне от основных линий передачи нагрузки к осям привода высоты. Это позволяет исправлять прогибы, которые могут превосходить допуски, подбором сечения определенных элементов крепления зеркала, почти не изменяя другие важные прогибы. Но нам не представилось случая воспользоваться этой возможностью, потому что предсказанное качество работы конструкции очень хорошо соответствует достигнутому на практике. Многие критические прогибы не измерялись непосредственно, иные оставлены как есть, поскольку оптическое качество телескопа согласуется с техническим заданием.

5.2. Монтировка телескопа

Конструкция, несущая оптику, весом 45 т вместе со всем своим грузом, поддерживается в свою очередь массивной стальной вилкой. Благодаря альтазимутальной геометрии вращение

по высоте можно осуществить на паре простых сферических шарикоподшипников с преднагрузкой. Вилка сделана из коробчатых секций с 25-мм стенками и переборками внутри, в центре для усиления имеется цилиндр (толщина стенки 75 мм). Цилиндр опирается на упорный конический шарикоподшипник с направляющей диаметром 2,5 м, в котором имеется 130 50-мм шариков. Этот подшипник гораздо дешевле гидростатической системы, и первые испытания вилки показали, что вращается он очень плавно. При полной нагрузке 120 т средний коэффициент трения в подшипнике равен $3 \cdot 10^{-4}$, а вариации трения намного меньше среднего значения. Вилка и подшипник прогибаются на 0,1" при нагрузочном моменте 3000 Н·м, приложенном перпендикулярно к оси вращения. Этого достаточно для сопротивления временным разбалансировкам и давлению ветра. Тorsiонная жесткость по оси азимута обеспечивает нижнюю частоту собственных колебаний около 5 Гц (см. ниже).

На обеих осях телескопа установлены почти идентичные приводы с пусковыми моторами постоянного тока и цилиндрическими прямозубыми шестернями среднего качества. Каждая ось снабжена двумя узлами с мотором и редуктором, которые при сопровождении работают навстречу друг другу, устраняя люфт; скорости моторов регулируются следящей системой с контуром постоянного усиления по сигналам обратной связи с тахометров. Точность сопровождения достигается применением 24-разрядных преобразователей угла поворота оси в код (датчиков) типа «Индуктосин». Абсолютная точность датчиков 1", точность отсчета малых углов соответствует всем 24 разрядам (0,08"). Обычно весь телескоп управляется специально предназначенной для этой цели микро-ЭВМ Nova 800. Она пересчитывает координаты объекта на текущую эпоху, определяет поправку за рефракцию и абберацию света, гнутые и ошибки юстировки телескопа и выдает соответствующие последовательности команд для наведения и сопровождения в горизонтальной системе координат (см. разд. 5.8).

Аналитические предсказания поведения вилки и приводов в общем неплохо оправдались. Однако при сборке и испытании в цеху в них был обнаружен один просчет. Одна из колебательных мод монтировки соответствует ее качанию на азимутальном подшипнике, потому что радиус канавки на направляющей немного больше радиуса самих шариков. Это движение учитывалось при общей оценке устойчивости к внешним силам, но его взаимодействие с приводом не было должным образом принято во внимание. Взаимодействие возникает от того, что оба редуктора азимутального привода находятся рядом по одну сторону вилки (в основном ради удобства). Таким образом, приложение момента сил к монтировке сопровождается и при-

ложением результирующей силы, способной возбудить качательную моду. Если поместить приводы диаметрально противоположно друг другу, то это взаимодействие исключается, зато монтаж будет все время наклонен за счет постоянных моментов, устраняющих люфт, хотя этот второй эффект можно компенсировать программно в матрице коррекций наведения. В настоящее время качательная мода дает самую низкую резонансную частоту монтажа (2,2 Гц) и ограничивает жесткость азимутального привода.

5.3. Башня МЗТ

С самого начала предполагалось, что МЗТ вместе со своими приборами будет управляться в основном дистанционно, а наблюдатель будет видеть фокальную плоскость с помощью чувствительной телевизионной системы. В то же время мы понимали, что МЗТ сам по себе является новым и сложным устройством, и для него будет создано множество новых вспомогательных приборов. Следовательно, мы стремились спроектировать башню МЗТ так, чтобы облегчить доступ к самому телескопу и сделать рядом с ним много лабораторных помещений для электроники, применяемой при наблюдениях, для калибровки и проверки оптических приборов.

С точки зрения проектирования башни важное преимущество альтазимутальной монтажа перед экваториальной заключается в том, что вращение башни соответствует движению телескопа по одной координате. Таким образом, вместо башни, увенчанной куполом, где рабочее пространство неизбежно находится ниже телескопа, мы предложили башню, которая более органично вмещает в себе телескоп и вращается вместе с ним по азимуту.

В проекте башни МЗТ были учтены важные пространственные, механические и температурные факторы. На рис. 4 представлен схематический вид башни. С точки зрения пространственной нам в первую очередь хотелось иметь помещение для наблюдений на уровне верхнего конца вилки, а потом создать дополнительные помещения над и под ним. Приходилось очень экономить место, чтобы облегчить доступ к телескопу и максимально использовать ограниченную площадку на вершине горы. Башня должна быть достаточно прочной, чтобы нести лаборатории и механизм створок, открывающих телескоп. С точки зрения механики желательны плавность вращения башни и точность следования за телескопом. Башня должна обеспечивать наблюдения при скорости ветра до 72 км/ч и выдерживать ветер до 225 км/ч. Температурный режим должен препятствовать образованию градиентов температуры на луче зрения, воз-

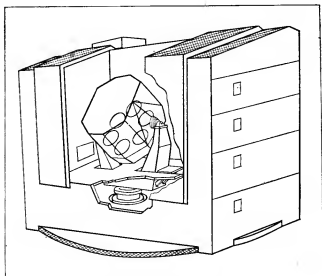


Рис. 4. В разрезе показаны МЗТ и его башня высотой 16,8 м.

никающих из-за выделения тепла из замкнутых пространств или от нагретой солнцем обшивки.

Получилась необычная по астрономическим меркам башня, показанная на рис. 1, 2 и 4. Она имеет прямоугольную форму (ширина 19,5 м, глубина 13,4 м, высота 16,8 м): при заданном объеме это дешевле, а побочные эффекты — ветровые моменты и парусность, — согласно расчетам, невелики. Нижняя часть башни играет роль глубокой опорной платформы, простирающейся от наблюдательного до первого этажа и ниже; плоскости основных ферм коробкой охватывают вилку телескопа. На этой платформе покоятся две трехэтажные «стенки» с комнатами, где помещаются и раздвигающиеся створки. На рис. 5 и 6 показано сечение башни. Вся башня весом 450 т установлена на четырех колесах шириной 13 см и диаметром 91 см, которые катаются по плоскому стальному рельсу, расположенному на 1 м ниже уровня земли на фундаменте, независимом от пилона телескопа. Колеса укреплены на шарнирах, чтобы всегда соприкасаться с рельсом по всей своей ширине и тем самым равномерно распределять нагрузку. Радиальное положение задается четырьмя колесами, которые упираются изнутри в боковой рельс. Два опорных колеса приводятся в движение пусковыми моторами постоянного тока мощностью 15 л. с. в составе следящей системы, сходной с приводом самого телескопа.

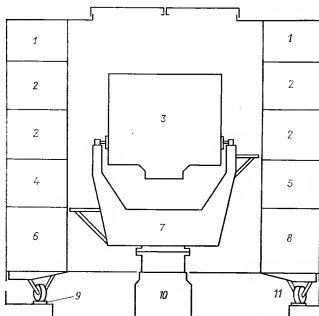


Рис. 5. Вертикальное сечение МЗТ и его башни (высота башни 16,8 м, ширина 19,5 м). 1 — склад; 2 — лаборатория; 3 — многозеркальный телескоп; 4 — ЭВМ для сбора данных и управления приборами; 5 — пульт управления; 6 — жилые помещения; 7 — вилка; 8 — криогенная техника; 9 — рельс; 10 — опора; 11 — колесо.

Информация о положении телескопа поступает на нее от датчика между вилкой и башней.

Телескоп теплоизолирован слоеными пористыми панелями снаружи и от нагретых помещений по бокам и снизу. Рабочее пространство тоже окружено сильной теплоизоляцией. Однако температура всего окружения телескопа хоть немного, но выше средней ночной, поэтому его вместе с примыкающим пространством охлаждают принудительно с помощью холодильных спиралей в полу (пол двойной, верхняя и нижняя половины разделены пенопластом) и обычных кондиционеров, охлаждающих и перемешивающих воздух, чтобы температура телескопа была всюду одинаковой и примерно соответствовала ночной. Вдобавок пол и вилка покрыты теплоизоляцией для снижения градиентов температур в пространстве у инструмента. Весь теплый воздух из башни засасывается в фундамент, который тщательно герметизирован (вращающаяся башня снабжена заслонкой, погруженной в канавку с жидкостью на фундаменте). Затем воздух

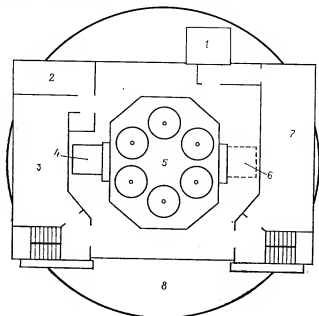


Рис. 6. Горизонтальное сечение МЗТ и его башни (ширина башни 19,5 м, глубина 13,4 м). 1 — лифт; 2 — склад; 3 — ЭВМ для сбора данных и управления приборами; 4 — нижняя платформа фокуса Нэсмита; 5 — многозеркальный телескоп; 6 — верхняя платформа фокуса Нэсмита; 7 — пульт управления; 8 — круглый фундамент.

пропускают по трубе и выбрасывают в 50 м от башни с той стороны, куда дует преобладающий ветер.

Электроэнергия подается через два трансформатора: один для механизмов и мощных нагрузок, другой для приборов. Второй трансформатор питается от мотора-генератора, который является фильтром нижних частот и исключает быстрые флуктуации в сети, а также выполняет функцию стабилизатора. Заземление от молнии и для приборов было тщательно продумано (его всегда трудно сделать на сухой вершине). Во многих местах, особенно в шурфах, пробуренных в скале при изысканиях, проложены медные шины. Имеется схема разветвления заземлений, чтобы не получалось замкнутых петель.

5.4. Оптика

В состав оптической схемы входят шесть основных телескопов (рис. 3), выполненных по классической схеме Кассегрена. В каждом из них параболические 1,8-м главные зеркала

имеют светосилу 1:2,7, а гиперболические вторичные зеркала обеспечивают окончательную светосилу 1:31,6. Положение фокуса регулируется продольным перемещением вторичных зеркал и может изменяться в диапазоне от квазикассегреновского фокуса, образуемого объединителем пучков 1:9 на расстоянии 787 мм за центром главного зеркала (фокус А), до фокуса на расстоянии 360 мм за центром главного зеркала, где сферическая aberrация равна нулю (фокус Б). Расчеты показывают, что в этом диапазоне фокусировки сферическая aberrация меняется в допустимых пределах ($<0,2''$).

В центре системы имеется 73-см телескоп для офсетного гидрирования системы Ричи—Кретьена с умеренно асферической пластинкой около фокуса для исправления астigmatизма. Фокальная поверхность сферическая, поэтому звездные датчики гидрирования перемещаются по сфере радиусом 56,4 см в широкоугольном поле зрения телескопа. В табл. 3 приводятся параметры основных и гидрирующего телескопов.

Таблица 3

Параметры оптической системы МЗТ для фокуса А

Параметр	Основные телескопы	Телескоп-гид
Диаметр, мм	1 818	730
Фокусное расстояние главного зеркала, мм	4 935	2 110
Постоянная Шварцшильда главного зеркала	-1,0000	-1,0145
Фокусное расстояние вторичного зеркала, мм	742	455
Постоянная Шварцшильда вторичного зеркала	-1,4358	-2,0677
Эффективное фокусное расстояние, мм	57 500	12 850
Светосила с оптическим вторичным зеркалом	1:31,6	1:17,6
Светосила с инфракрасным вторичным зеркалом	1:33,8	—
Масштаб изображения, мкм на 1"	279	62

Телескоп-гид изготовлен обычными методами. Так как главное зеркало отличалось от параболы всего на 1,45 %, при ретуши его контролировали в автоколлимационной схеме с плоским зеркалом, и в полученной из фокуса интерферограмме оставляли определенные остаточные погрешности. Ретушь вторичного зеркала осуществлялась при автоколлимационном контроле собранного телескопа. Главное зеркало сделано из довольно толстого диска диаметром 73 см и толщиной 15 см, оно крепится в оправе с помощью системы механических разгрузок.

Главные зеркала основных телескопов — облегченной конструкции, с сотовой структурой — сделаны из плавленого кварца. Первоначально они предназначались для других целей, поэтому

пришлось вернуть их фирме «Корнинг Гласс», чтобы «продать» переднюю поверхность заготовок и придать ей примерно такую кривизну, какая требуется для получения в конечном счете параболических зеркал светосилой 1:2,7. Главные зеркала обрабатывались в мастерской Оптического центра на двух больших полировальных станках. Сначала сформировали и отполировали выпуклые задние поверхности зеркал, затем обрезали по краю передние и задние пластины, а потом уж обработали, отшлифовали и отполировали передние поверхности зеркал, придав им сферическую форму с радиусом, соответствующим радиусу кривизны краевых зон расчетных параболоидов. На этом этапе с помощью интерферометров проверялось отсутствие у зеркал астигматизма. Зеркала контролировались на разгрузке в виде воздушной камеры, напоминающей настоящую разгрузку в телескопе. Если при испытаниях зеркала покоились на воздушном мешке, то на станке они лежали на двух слоях обычных войлочных прокладок, и их переносили со станка на испытательный стенд и обратно. Радиусы кривизны шести зеркал измерялись рулеткой из инвара во время горизонтального контроля с ножом Фуко из центра кривизны. Они сделаны одинаковыми с точностью до 3 мм ($\pm 0,03\%$). Параболизация проводилась путем полировки асферической поверхности в центре зеркала, оставляя края в неприкосновенности. Таким образом, в процессе производства радиус краевой зоны все время играл роль опорного. К тому же отказ от обработки внешней зоны позволил избавиться от обычного в таких случаях «завала» края зеркала, и это очень полезно, потому что край должен использоваться в оптической системе юстировки телескопа. При грубой параболизации делался горизонтальный контроль с ножом и проволокой, а на заключительных этапах велись измерения с нуль-корректором и интерферометром в вертикальной башне.

Вначале была поставлена цель собрать 90 % энергин в кружке диаметром 0,5". Большинство зеркал почти удовлетворяет этому требованию (см. табл. 4). На рис. 7 нанесены кривые концентрации энергин всех зеркал. Нетрудно заметить, что по качеству они неодинаковы, хуже всего оказалось зеркало № 6, отчасти из-за остаточного астигматизма. Интерферограммы для шести зеркал, полученные при нуль-тесте, показаны на рис. 8. Прямые полосы свидетельствуют о достаточно хорошей параболической форме зеркал. Наиболее заметные отклонения от параболоида проявляются в круговых зонах, оставшихся после полировки. Кривые геометрической концентрации были получены после обработки интерферограмм на ЭВМ. Полный расчет качества главных зеркал с учетом дифракции показывает, что средний диаметр функции рассеяния точки по

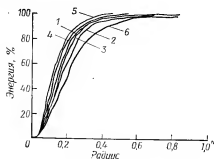


Рис. 7. Энергия, заключенная в кружке данного радиуса (концентрация) для шести главных зеркал МЗТ, вычисленная методами геометрической оптики по результатам лабораторных испытаний. Для всех зеркал, кроме шестого, 90 % энергии попадает в кружок диаметром 0,6".

уровню 0,5 равен всего 0,14". В табл. 4 приводятся данные о среднеквадратичных ошибках поверхности и концентрации энергии зеркал, полученные как при цеховых испытаниях, так и в рабочих оправках под разными углами к горизонту. Имеется полное описание проекта и качества работы оптической системы МЗТ [54].

Таблица 4

Качество главных зеркал МЗТ

Номер зеркала	Диаметр кружка, заключающего 90 % энергии	Среднеквадратичная ошибка поверхности в длинах волн ($\lambda = 0,6328$ мкм)
1	0,58''	0,105
2	0,64	0,096
3	0,56	0,113
4	0,56	0,099
5	0,54	0,102
6	0,86	0,128
Среднее	0,62	0,107

В конструкции МЗТ облегченные сотовые зеркала применяются впервые в условиях силы тяжести и переменного наклона. Каждое главное зеркало фиксируется в осевом направлении тремя точечными опорами, а большая часть его веса «плавает» на воздушной камере, где давление меняется с углом высоты. На три жесткие осевые опоры приходится 7 % веса зеркала. Положение зеркала в радиальном направлении задается противовесами, которые через систему рычагов 11:1 передают усилие на пару цепей, охватывающих нижние половины передних и задних пластин зеркала. Регулировкой цепей добиваются того, чтобы зеркало, направленное «в горизонт», не имело астигматизма. Реакция радиальных упоров составляет

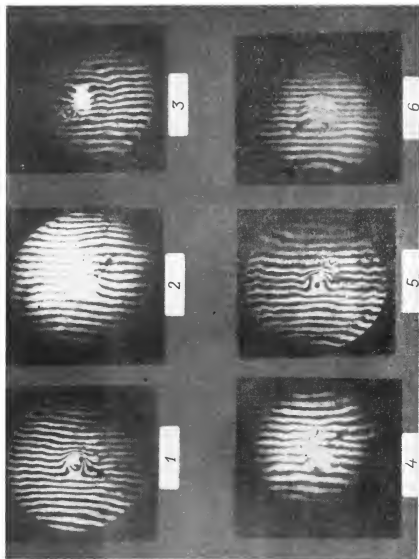


Рис. 8. Интерферограммы главных зеркал МЗТ, показывающие остаточные ошибки поверхности. Указаны номера зеркал.

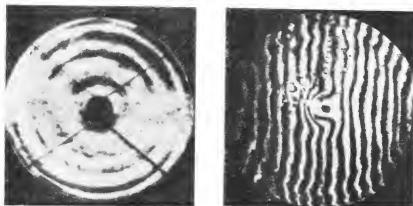


Рис. 9. Слева — теневая картина телескопа с зеркалом № 5 по звезде. Справа — интерферограмма этого зеркала. Обратите внимание на заметные зональные ошибки; наибольшая из них имеет максимальный размах $\lambda/6$.

всего несколько килограмм и приложена к инварному кольцу, приклеенному в середине задней поверхности зеркала.

Телескоп снабжен 12 вторичными и 12 диагональными зеркалами, по шесть штук для оптических и инфракрасных наблюдений. Вторичные зеркала ИК-диапазона сделаны меньше и тоньше оптических, чтобы убрать излучение от краев главных зеркал и уменьшить инерцию, облегчая тем самым механическую модуляцию. В процессе производства все 12 вторичных зеркал контролировались вогнутой гиперболической пробной пластиной, которая сама была испытана на интерферометре с нуль-корректором. Следовательно, их радиусы одинаковы.

Оптические элементы исследовались в рабочих условиях на телескопе по звездам. На рис. 9 показаны теневая картина, полученная с ножом Фуко, и интерферограмма одного из зеркал. Круговые зональные ошибки, оставшиеся после завершения полировки, очень хорошо видны и во внефокальных изображениях звезды во всех шести телескопах. Они-то и преобладают во всех этих тестах, другие отклонения поверхности не столь существенны. Разумеется, при теневом контроле исследуется первая производная (наклон) уклонений поверхности в направлении, перпендикулярном ножу, а внефокальные изображения показывают их кривизну (вторую производную). В таких сравнительно малосветосильных телескопах, как МЗТ (1:31,6) эта кривизна очень хорошо заметна. Как показывает более подробный анализ теневых картин, в некоторых телескопах имеется лишь очень небольшая кома, а астигматизм есть только в двух из них. Для устранения этих аберраций

предстоит отрегулировать разгрузки зеркал. Качество звездных изображений очень хорошее и определяется в основном турбулентностью атмосферы (см. разд. 5.9). Зарегистрированы изображения диаметром менее $0,5''$ по уровню 0,5, а секундные изображения встречаются часто. Даже в таких ситуациях размер изображения зависит не от качества оптики, а прежде всего от воздушных неоднородностей внутри и вне башни. Не вызывает сомнения, что дальнейшее улучшение теплового режима башни еще сильнее улучшит качество изображения. Посмотрим, будет ли оно тогда ограничиваться оптикой телескопов.

Средний диаметр неэкранируемого поля зрения равен $35''$, в то время как оптимальный теоретический диаметр $52''$ [4]. Поле зрения будет увеличено посредством юстировки. С другой стороны, экранирование увеличивается медленно, и даже в поле диаметром $4'$ оно не превосходит 50 %

5.5. Взаимная юстировка телескопов

Требования к взаимной юстировке. Для того чтобы получить и поддерживать точное совмещение изображений от шести телескопов, необходимо: 1) иметь независимую регулировку положения каждого изображения, 2) добиваться первоначального совмещения и 3) непрерывно обнаруживать смещения отдельных изображений относительно суммарного.

В МЗТ первое условие осуществляется дистанционным управлением наклонами каждого вторичного зеркала по двум осям, второе — телевизионным контролем фокальной плоскости (либо визуальным, либо на ЭВМ с помощью программ центрирования) и третье — периодическим возобновлением совмещения, или внутренней системой «искусственной звезды» с лазерными пучками.

Требования к точности юстировки зависят от общего оптического качества телескопа, от гидирования, астроклимата и ожидаемого применения инструмента. По данным цеховых измерений с учетом ошибок поверхностей главного, вторичного, диагонального зеркал и объединителя пучков, сферической аберрации и разъюстировки, отдельные кассегреновские телескопы собирают 90 % света от точечного источника в кружке диаметром $0,7''$, а диаметр изображения по уровню 0,5 около $0,2''$. Атмосферное качество изображения в среднем равно $1''$ (диаметр по уровню 0,5), но доходило и до $0,5''$. При современных спектроскопических, панорамных и интерферометрических наблюдениях на МЗТ могут использоваться изображения менее $1''$; значит, требуется такая точность совмещения, которая заметно не ухудшит качество отдельных телескопов, то есть ошибки совмещения около $0,1''$. Такая точность, кстати, пре-

восходит допуск, предусматривавшийся при разработке и проектировании телескопа. Тогда думали, что характерный диаметр турбулентного диска будет равен 2—3", а не 1", как теперь часто бывает, и потенциальные возможности МЗТ для панорамных наблюдений и интерферометрии не были в полной мере осознаны.

Диапазон смещения отдельных изображений определяется жесткостью опорной конструкции, которая в свою очередь диктуется величиной наибольшего допустимого искажения изображения из-за разъюстировки. Согласно критериям, приведенным в разд. 5.1, наибольший сдвиг изображения равен 300". В интервале углов высоты от 17 до 88° наблюдается взаимное смещение изображений в шести телескопах $\pm 20''$, а типичная и наибольшая скорости его изменения при сопровождении звезды составляют соответственно 0,05 и 0,2" в минуту.

Регулировка положения изображений. Привод, наклоняющий вторичное зеркало, спроектирован с учетом требований к совмещению изображений. Его характеристики таковы:

Наименьший шаг по углу: смещение изображения в фокусе на 0,059".

Диапазон смещения: 600".

Максимальная скорость смещения: 12" в 1 с.

Движение передается зеркалу парой стальных стержней диаметром 12 мм, обеспечивающих и точное управление наклоном, и высокую жесткость в осевом направлении, достаточную для работы устройства ИК-модуляции вторичным зеркалом. Наклоны задаются парой микрометрических винтов, нагруженных пружинами и соединенных через редуктор 110:1 с шаговым двигателем (100 шагов за оборот). Один шаг мотора перемещает винт на 0,058 мкм, наклоняет вторичное зеркало на 0,23" и сдвигает изображение в фокусе на 0,067".

Узел привода дает также возможность дистанционно управлять фокусировкой. Применение точных направляющих гарантирует неизменность наклона зеркала при фокусировке. Привод с пусковым мотором обеспечивает минимальное перемещение зеркала в 1 мкм. Моторы фокусировки и наклонов будут управляться от ЭВМ по командам, поступающим с клавиши ручного управления или от устройства центрирования изображений. Работающие теперь приводы заменили первые приводы МЗТ, где все три движения производились пусковыми моторами, а точность установки была ниже. Имеется дополнительная возможность точно согласовать направления главных осей телескопов наклонами диагональных зеркал. Соответствующая система спроектирована, но пока не сделана.

Начальное совмещение. Для начального совмещения шести изображений нужно точно определить взаимное положение их центров и подать эту информацию на приводы вторичных зеркал для соответствующей коррекции. В движении изображений имеется общая компонента из-за турбулентности и ошибок сопровождения, поэтому важно измерять взаимное расположение всей шестерки одновременно. Для этого создана ПЗИ-камера¹ с матрицей серии GE TN2200, управляемая микропроцессором Z-80. Масштаб изображения на матрице из 128×128 элементов соответствует размеру элемента $0,16''$. В рабочих условиях будут экспонироваться шесть разделенных изображений. Этот кадр запоминается и используется для определения центроидов отдельных изображений с точностью лучше $0,05''$. На всю операцию затрачивается около 10 с; это время зависит от яркости звезды. Потом результат измерения вводится в ЭВМ, которая управляет приводами вторичных зеркал и производит соответствующие коррекции. Хотя ПЗИ-камера обладает замечательной геометрической стабильностью, пока что ее поле зрения невелико, и звезды требуются довольно яркие ($m_V = 5$ без ЭОПа, $m_V = 10$ с ЭОПом).

Была разработана другая система совмещения изображений с помощью высокочувствительной телевизионной установки для отождествления и гидирования (см. разд. 6.2). Она обеспечивает возможность непрерывно наблюдать звезды до $m_V = 18$ в поле $4'$ вокруг щели спектрографа или диафрагмы фотометра. В оптической системе имеется место, где сфокусированы зрачки телескопов; туда установлен набор призм, немного отклоняющих каждое изображение, и там же может работать селектор зрачков, чтобы, если нужно, рассматривать отдельные изображения. С этой системой можно за несколько секунд вручную совместить изображения с точностью $0,2''$. Эта процедура будет автоматизирована с помощью программы нахождения центроидов, и точность повысится до $0,1''$. Одновременно система будет работать на МЗТ в качестве автогида.

Обнаружение рассовмещения. В зависимости от ориентации телескопа приходится для сохранения совмещения с точностью $0,1''$ подправлять его каждые 30—600 с (обычно каждые 120 с) с помощью ПЗИ-камеры по яркой звезде или с помощью телевизионного гида по звезде в поле зрения (вручную или автоматически). Проектируются оптическая система и вычислительные средства с программами, чтобы обеспечить непрерывное телевизионное гидирование прямо по отдельным изображениям, что позволит исправлять совмещение до 10 раз в секунду.

¹ ПЗИ — приборы с инжекцией заряда, твердотельные матричные кремниевые светоприемники. — *Прим. перев.*

Если аппаратура или условия наблюдений (например, дневные наблюдения или отсутствие в поле гидрировочной звезды) не позволяют применить описанные выше методы, то в качестве внутреннего механизма для определения дрейфа юстировки будет использоваться система с искусственной звездой и лазерными пучками. Основные элементы этой лазерной системы показаны на рис. 10 и 11. Она подробно описана [51, 40]. В центре шестиугольника из телескопов расположен 73-см телескоп 1:17,6 системы Ричи—Кретьена, предназначенный для гидрирования и юстировки МЗТ (табл. 3).

Этот телескоп служит при юстировке в качестве коллиматора с лазерным точечным источником. Вторая лазерная система обеспечивает непрерывную автоматическую настройку этого телескопа, чтобы поддерживать коллимацию с необходимой точностью 0,1". Выходящий пучок передается к периферии шести больших телескопов тремя перископами длиной 1,8 м и оттуда направляется на апертуры телескопов шестью комбинациями крышеобразной и прямоугольной призм, работающими как вытянутые уголкового отражатели. И перископы, и уголки обладают тем свойством, что выходящие лучи остаются параллельными или антипараллельными падающими независимо от наклона устройства, если оно ведет себя как твердое тело. Испытывался прототип перископа, и его стабильность оказалась лучше 0,05".

С одним краевым лучом нельзя отличить изменение фокуса от изменения наклона, поэтому на апертуру парой пентапризм направляется второй пучок, как показано на рис. 10 и 11. Затем оба пучка регистрируются в фокусе кремниевыми приемниками, причем фокусирующий пучок падает на приемник из двух половин, чувствительный только к радиальным смещениям (пентапризмы инвариантны к наклонам только в одной плоскости), а главный пучок падает на квадрантный приемник, чувствительный и к радиальным, и к азимутальным сдвигам. Эти сигналы обрабатываются в ЭВМ для исключения шумов и эффектов турбулентности, и после усреднения обеспечивают требуемую точность визирования. С их помощью рассчитываются коррекции наклонов и фокусировки для приводов вторичных зеркал.

На рис. 11 показаны пары клиньев, которые служат для дистанционной установки наклонов каждого пучка по двум направлениям, чтобы вначале задать фокус телескопа и положение изображений. До настоящего времени лазерная система работала только с основными пучками, без фокусирующих, и управляла пусковыми моторами вторичных зеркал непосредственно, без обработки и усреднения. В этих экспериментах среднеквадратичная точность совмещения составила 1" на интервалах в 1—2 ч, а медленный дрейф уменьшился на порядок.

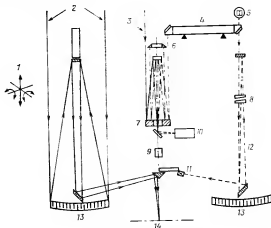


Рис. 10. Ход лучей в лазерной системе юстировки. 1 — три оси привода вторичного зеркала; 2 — свет от звезды; 3 — свет от звезды, падающий на гид; 4 — большой перископ; 5 — узел переброски и вытянутый ретрорефлектор; 6 — вытянутый ретрорефлектор системы автофокусировки; 7 — ситалловое зеркало диаметром 0,7 м; 8 — тонкие клинья (призмы Рисли) и пентапризмы; 9 — приемник автогида; 10 — лазер; 11 — квадрантный кремниевый приемник системы юстировки; 12 — лазерные юстировочные лучи (по 2 на телескоп); 13 — облепченное 1,8-м главное зеркало; 14 — общая фокальная плоскость.

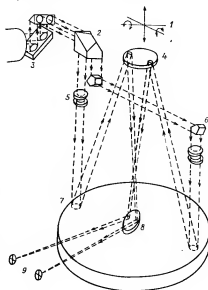


Рис. 11. Лазерная система юстировки одного из телескопов. 1 — три оси привода вторичного зеркала; 2 — узел переброски и вытянутый ретрорефлектор из прямоугольной и крышеобразной призм; 3 — большой перископ; 4 — вторичное зеркало; 5 — тонкие клинья (призмы Рисли); 6 — пентапризма; 7 — главное зеркало (1,8 м); 8 — диагональное зеркало; 9 — квадрантный кремниевый приемник света.

Прямое одновременное наблюдение за лазерными пучками и изображениями звезд в фокусе показало, что с полностью работающей лазерной системой можно добиться гораздо лучшего совмещения.

Методы сохранения совмещенного изображения эволюционировали по сравнению с первоначальным проектом за период с 1979 г., когда на телескопе начались наблюдения. Ожидается дальнейший серьезный прогресс в этом плане по мере накопления опыта работы с этим уникальным инструментом.

5.6. Возможности инфракрасных наблюдений на МЗТ

Общие соображения. В течение нескольких лет в Аризонском университете были разработаны и проверены общие принципы проектирования наземных ИК-телескопов путем модификации небольших инструментов, таких, как 0,71- и 1,55-м телескопы. Эти принципы и предельные возможности построенных в соответствии с ними телескопов описали Лоу и Рике [38]. МЗТ представляет собой попытку распространить указанные принципы на более крупный инструмент нового типа, который сохраняет все преимущества апробированных меньших телескопов без риска и неопределенности, связанных с применением в аналогичном инструменте гораздо большего масштаба старых технических решений.

Дополнительное фундаментальное преимущество МЗТ в задачах, где существует максимальная разрешающая способность, — его незаполненная апертура. Столь же важной причиной его создания, которая, однако, до сих пор вызывает немало споров и будет еще изучаться, было стремление получить проект, существенно снижающий стоимость очень крупных телескопов и способный удовлетворить основные запросы как оптической, так и инфракрасной астрономии. Предельные возможности МЗТ в ИК-диапазоне пока не достигнуты, но несомненно, что еще не создан телескоп, способный сравниться с ним в этой области. Приведем краткий перечень тех особенностей проекта, которые влияют на ИК-наблюдения.

Телескоп, спроектированный для ИК-диапазона, отличается, вообще говоря, следующим: 1) минимальным уровнем фона, излучаемого телескопом, т. е. минимальным числом неохлажденных зеркал и легкостью обновления покрытий на малых зеркалах, 2) стабильностью фона, т. е. исключительной внутренней жесткостью в отношении ветровых нагрузок и нечастым перемещением неохлаждаемых зеркал, 3) средствами для вычитания фона, например модуляцией вторичным зеркалом. Важно также иметь плавное сопровождение с точностью до долей секунды дуги и наведение с точностью до секунд.

Оптическая схема. Конфигурация из шести одинаковых 1,8-м телескопов светосилой 1:33,8, расположенных вокруг общей оси, позволяет сохранить все особенности хорошо зарекомендовавшего себя 1,55-м ИК-телескопа светосилой 1:45. Размер инфракрасных вторичных зеркал сделан немного меньше диаметра пучка, чтобы они играли роль «холодной» апертурной диафрагмы на фоне неба. Два из трех неохлажденных зеркал легко обивляются и могут быть снабжены специальными ИК-покрытиями, а главные зеркала сравнительно невелики, и на них довольно легко поддерживать свежие и чистые покрытия. Таким образом, можно получить и сохранить общую излучательную способность телескопа всего в 5 %. Четвертое зеркало системы, объединитель пучков, необходимо, очевидно, охлаждать вместе с приемником, спектральными фильтрами, перебрасывающей оптикой и блендами.

Качающиеся вторичные зеркала. Ввиду их важности для ИК-наблюдений качающиеся зеркала заслуживают особого внимания. Доказано, что среди простых способов вычитания фона нет ничего лучше сканирования пучка по небу наклоном вторичного зеркала. При помощи линейного мотора с сервосистемой и чувствительного механического преобразователя можно осуществить очень точные прямоугольные или линейные сканы размахом от нескольких секунд до нескольких десятков секунд дуги. Малый размер вторичных зеркал допускает модуляцию с частотой более 20 Гц при малом потреблении мощности и без искажения изображений из-за гнущегося зеркала или из-за проскакивания по инерции. Спроектированный для МЗТ механизм качания вторичных зеркал допускает точный поворот направления качания вокруг оптической оси телескопа, так что можно совместить «двенадцать» ИК-изображений. Качание полностью независимо от системы совмещения изображений, которая также наклоняет вторичные зеркала.

Качество работы. Качающиеся вторичные зеркала и инфракрасный фотометр, описанный в разд. 6, впервые работали на МЗТ в октябре 1980 г. Измеренная чувствительность в точности соответствовала чувствительности 1,55-м телескопа, пересчитанной к 4,5-м суммарной апертуре МЗТ. Иначе говоря, в ИК-диапазоне МЗТ работает так же, как обычный полностью оптимизированный инфракрасный телескоп диаметром 4,5 м.

Лучший пример, показывающий чувствительность МЗТ,— обнаружение радиисточника с плоским спектром 0332 + 078 на волне 2,2 мкм, где он имеет звездную величину $18,40 \pm 0,25$. Сигнал в диафрагме 9" накапливался 1 ч, уровень в 1σ соответствует звездной величине 20,0. Источник дважды не смог зарегистрировать на волне 2,2 мкм на 2,25-м телескопе observa-

тории Стюард, на пластинках Паломарского атласа неба в этом месте ничего нет, нет его и на визуальной пластинке с большим пределом, полученной на 4-м телескопе обсерватории Китт-Пик. Это первый пример внегалактического ИК-источника, необнаружимого в оптическом диапазоне. Измеренный поток от него вчетверо меньше потока от самого слабого объекта, наблюдавшегося до сих пор на волне 2,2 мкм.

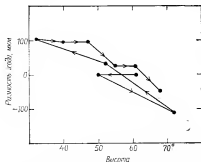
5.7. Интерферометрия

Поскольку по полному размаху апертуры (6,9 м) МЗТ превосходит все действующие оптические и ИК-телескопы, он в принципе обладает самой высокой разрешающей способностью на этих волнах. Это обстоятельство наряду с тем, что МЗТ — первый из числа крупных составных телескопов, которые, возможно, будут построены, указывает на важность МЗТ как инструмента для интерферометрии в оптическом и ИК-диапазонах. Важным стимулом для работающих в этой области является обнаруженное недавно исключительно хорошее качество изображений на МЗТ по сравнению с другими крупными телескопами в районе Тусона. Для реализации полного углового разрешения МЗТ нужно взаимно «сфазировать»¹ отдельные телескопы и устранить различия в изменении состояния поляризации падающих пучков. Пока интерференцию в видимом и ИК-диапазонах получали только для пар противоположных телескопов. Косые отражения от диагональных зеркал и объединителя пучков изменяют состояние поляризации света, но для этих пар изменение одинаково. Оптические пути в двух телескопах подстраивают до тех пор, пока не получится интерференция.

Д. У. Мак-Карти и Ф. Дж. Лоу уже использовали МЗТ в качестве двухэлементного интерферометра на волне 5 мкм и измеряли равенство оптических путей в трех парах телескопов и стабильность одной пары. Решается задача фазирования МЗТ на более длинных волнах. По данным Мак-Карти, показанным на рис. 12, собственная стабильность разности хода достаточна для фазирования на волне 20 мкм, а может быть и на волне 10 мкм. Длина когерентности $\lambda^2/\Delta\lambda$ зависит от длины волны и ширины полосы, и ее, следовательно, можно увеличить в светоприемной системе за счет сужения полосы, чтобы продвинуть интерферометрию в сторону коротких волн. К. Хидж действительно получил полосы в видимом свете при

¹ Под фазированием здесь понимается выравнивание разностей хода до возникновения интерференции, т. е. с точностью до длины когерентности излучения. — *Прим. перев.*

Рис. 12. Разность хода для пары двух противоположных телескопов в зависимости от угла высоты.



$\Delta\lambda$ до 0,01 мкм. Однако в конце концов придется придумать способ непрерывного измерения и управления оптической длиной пути в каждом телескопе.

5.8. Цифровые системы управления телескопом и сбора данных

При обычных наблюдениях на МЗТ используются две вычислительные системы. Скоро к ним добавится третья для контроля юстировки. Первая система называется ЭВМ монтировки и предназначена прежде всего для управления ее следящими системами. Как показано на рис. 13, она состоит из мини-ЭВМ Nova 800 фирмы «Дейта дженерал» с несколькими устройствами ввода и вывода. Большие объемы информации хранятся на двух гибких дисках. Внешние сигналы поступают непосредственно в ЭВМ и обрабатываются там для обновления сигналов управления приводами телескопа. Вторая вычислительная система называется приборной и показана на рис. 14. Здесь применяется ЭВМ того же типа Nova 800, что и для управления монтировкой, с аналогичными терминалами. Приборная ЭВМ служит для дистанционного управления работой приборов, записи, калибровки и отображения результатов. Данные могут записываться на жесткий диск емкостью 50 Мбайт и 9-дорожечную магнитную ленту. Трехмерные данные (черно-белые изображения) можно получать, отображать и выдавать в виде фотоснимка. Вдобавок обе вычислительные системы соединены между собой парой двунаправленных оптически изолированных каналов связи.

Наведение МЗТ осуществляется движением альтазимутальной монтировки под управлением ее вычислительной системы. Каждые 100 мс снимаются отсчеты абсолютных датчиков угла поворота осей с точностью 0,077" и сравниваются с расчетным положением источника. Рассогласования служат для выработки команд подачи корректирующих моментов в следящих системах второго рода по положению и скорости обеих осей. Следящие

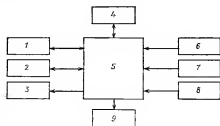


Рис. 13. Блок-схема системы управления монтировкой (см. обозначения в подписи к рис. 14).

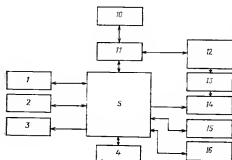


Рис. 14. Блок-схема приборной вычислительной системы. 1 — телетайп; 2 — графический дисплей; 3 — видеомонитор; 4 — спаренные гибкие диски; 5 — мини-ЭВМ Nova 800, длина слова 16 бит, емкость памяти 32 К; 6 — часы; 7 — датчики углов поворота телескопа; 8 — выносные клавиши; 9 — следящие приводы телескопа; 10 — прибор наблюдателя; 11 — интерфейс; 12 — телевизионная графическая система; 13 — графопостроитель; 14 — жесткий диск; 15 — магнитная лента.

системы состоят из четырех электронных контуров для управления моментом, скоростью и положением с отрицательной обратной связью и для улучшения характеристик по ускорению с петлей положительной обратной связи по скорости источника. Обратная связь по моменту и скорости реализована аппаратно, а петля обратной связи по положению замкнута через управляющую ЭВМ, где в процессе сопровождения рассогласование по положению интегрируется и образуется сигнал управления скоростью. В цифроаналоговом преобразователе он переводится в напряжение и подается в электронный контур управления скоростью. При переводе на другой объект автоматически включается другой алгоритм, чтобы обеспечить оптимальное движение телескопа. В этом случае команда скорости пропорциональна квадратному корню из величины рассогласования по положению, взятому с соответствующим знаком. Таким образом, телескоп должен двигаться по параболической траектории. Программные ограничения на скорость и ускорение приводят к тому, что скорость телескопа плавно нарастает до максимальной и так же плавно сбрасывается, чтобы телескоп точно «подошел» к источнику. Алгоритм перевода телескопа делает его движение оптимальным даже при сопровождении быстродвижущихся объектов.

Разработана динамическая модель следящей системы телескопа в комплексной плоскости частот. Проводились также механические и электрические измерения основных физических характеристик привода, таких, как момент инерции, коэффициент упругости, коэффициент вязкого затухания и момент мотора. Затем с помощью имитации на ЭВМ определялись параметры электронных цепей и управляющей программы, оптимизирующие качество управления положением. В частности, эта модель оказалась очень полезна для уменьшения ошибок сопровождения, обусловленных ветровыми возмущениями. Частотные спектры соответствующих ошибок измерялись путем введения возмущений, действующих аналогично переменным моментам от ветра или трения. Согласие с модельными расчетами оказалось хорошим в диапазоне нескольких порядков по частоте. Улих и Райли [61] подробно описали систему управления монтировкой.

При сопровождении объектов, перемещающихся суточным движением, отсчет датчика угла совпадает с вычисленным с точностью до младшего разряда, то есть до $0,07''$ в среднеквадратичной мере. Мы выяснили, что после коррекции систематических ошибок датчиков даваемые ими координаты соответствуют координатам звезды с точностью не хуже $0,25''$ в течение 10 мин и более. Конечно, из-за проекции ошибка азимута уменьшается, она умножается на косинус высоты при пересчете в истинный угол на небесной сфере. Действительно, около зенита телескоп ведет лучше. Из-за ограниченной скорости вращения по азимуту в зените есть зона избегания¹ радиусом около $0,16^\circ$. Ошибки сопровождения возрастают, когда около телескопа дует заметный ветер, и при порывистом ветре в 50 км/ч они в среднем доходят до $0,5''$.

При расчете требуемых сигналов датчиков следует исправить истинное положение источника за атмосферную рефракцию, погрешности монтировки и смещение нуля. Оптическая рефракция изучена достаточно хорошо, коррекция за нее не составляет труда и делается с высокой точностью. В программу управления вводятся температура и атмосферное давление, рассчитывается коэффициент рефракции и выдается на индикацию его текущее значение. В вычисленное видимое положение источника автоматически вносятся поправки за гнутые, отклонение оси азимута от вертикали, неперпендикулярность осей, ошибки юстировки и сдвиги в фокусе². Соответствующие коэффициенты определяются по минимуму суммы квадратов невя-

¹ В этой зоне телескоп не может сопровождать звезду.— *Прим. перев.*

² Подробнее см. статью П. Т. Уоллеса в сб. «Оптические телескопы будущего».— М.: Мир, 1980, с. 106.— *Прим. перев.*

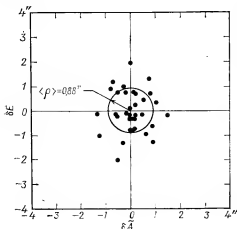


Рис. 15. Ошибки наведения по азимуту (δA) и высоте (δE) для нескольких звезд в разных частях неба.

зок для большого числа измеренных ошибок наведения. На рис. 15 показаны остаточные отклонения для серии таких наблюдений, выполненных в течение одной ночи на ПЗИ-камере, установленной в фокусе телескопа-гида [50]. Средняя ошибка наведения при использовании оптимальных значений коэффициентов составила бы $0,88''$, а среднеквадратичная $1,12''$. За несколько недель коэффициенты немного меняются, поэтому для получения такой же точности наведения, как на рис. 15, приходится часто повторять юстировку. Добавим, что в ходе специальных исследований обнаружено несколько периодических ошибок угловых датчиков, исправление которых должно улучшить точность наведения. Таким образом, хотя с действующей системой МЗТ наводится «вслепую» гораздо точнее обычных телескопов, точность его наведения можно будет существенно повысить.

5.9. Место установки телескопа, качество изображения и астроклимат

О выборе Маунт-Хопкинс рассказано в разд. 3 и 4. Решение поместить МЗТ на самую вершину горы было в какой-то степени неизбежным, но все же оно принято не без дополнительной проверки. Велись измерения астроклимата по ширине суточного следа звезды в 10-см телескопе. Они показали, что на самой вершине и на двух более низких возвышениях к северу и востоку астроклимат вполне сравним и хорош. Вершину выбрали потому, что при ясной погоде там преобладают западные ветры, и потому, что она хотя и мала по площади, но все-таки больше других возвышений.

Мы старались сохранить естественную низкую горную растительность на южном склоне, и поэтому пришлось сделать последний участок дороги очень крутым (уклон 22 %), проложив ее по северо-восточному гребню пика. При меньшем уклоне значительная часть поверхности дороги оказалась бы под прямыми солнечными лучами. Свободное пространство вокруг здания покрыто светлым гравием. Таким образом, башня оказалась практически на уступе с крутыми (наклои 45—90°) естественными склонами со всех сторон, кроме северо-восточной. Мы рассчитывали, что вокруг башни нагрев будет достаточно равномерным, а тепловая инерция небольшой, и это обеспечит наилучшие условия с учетом малой высоты телескопа (9 м над уровнем земли), неизбежной при ограниченности средств.

Как уже говорилось, мы заботились о малой тепловой инерции на всех этапах проектирования телескопа и башни. Этому немало способствуют открытая конструкция трубы телескопа и легкая обшивка башни, под которой всюду имеется хорошая теплоизоляция. Пол помещения для наблюдений и вилка обязательно должны быть массивны, поэтому их планируется активно охлаждать. Боковые части вилки и пол изолированы слоем пенопласта и фанеры, чтобы уменьшить тепловую постоянную времени их поверхностей. Пока главная система охлаждения не работает (не приобретен холодильный агрегат), но тем не менее качество изображения на МЗТ по крайней мере не хуже, чем на Китт-Пик или Маунт-Леммон. Безусловно, очень полезна здесь и такая особенность конструкции, как исключительно открытое пространство у телескопа, что обеспечивает свободную циркуляцию воздуха без вентиляторов и большой открытый небу телесный угол, способствующий лучистому охлаждению.

Качество звездных изображений на МЗТ регулярно измеряется с помощью ПЗИ-камеры, помещенной в квазикассетновском фокусе. Одна секунда дуги соответствует шести элементам разрешения камеры. По опыту годичных наблюдений типичное качество изображений на МЗТ равно 1" (диаметр по уровню 0,5 — $D_{0,5}$). Изредка бывают изображения лучше 0,5" и хуже 2". Большая часть искажений, по-видимому, возникает в телескопе и вблизи него. Благодаря наличию лазерной системы юстировки (см. разд. 5.5) мы имеем возможность измерять внутренний астроклимат МЗТ, записывая переменный сигнал рассогласования с приемников лазерных пучков. Положение лазерных изображений испытывает значительные флуктуации. Их полный размах, как правило, доходит до 1—2",

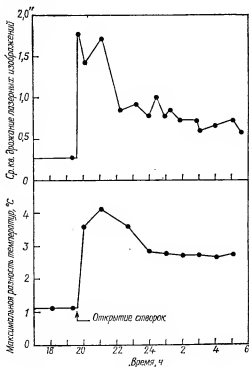


Рис. 16. Разность температур и внутренний астроклимат, измеренный по дрожанию лазерных изображений, в зависимости от времени (6 августа 1980 г.). Максимальная разность температур обычно наблюдается между вилкой или полом и воздухом.

а частоты лежат в интервале от 0,4 до 4 Гц, причем при закрытых створках преобладают медленные компоненты, а при открытых створках и ветре — быстрые. На рис. 16 показан ход флуктуаций направления лазерных пучков в течение ночи, а также максимальная разность температур (между вилкой и воздухом). Обе эти характеристики имеют заметную величину и, вероятно, связаны между собой. Можно оценить вклад внутреннего астроклимата в полное уширение звездного изображения, если учитывать его только в рамках геометрической оптики. Размер неоднородностей вызывающих искажения превышает 25 мм — диаметр лазерного пучка на апертуре телескопа. Визуальные наблюдения указывают на то, что размер неоднородностей в основном меньше диаметра телескопов. В таком случае можно прямо связать смещение лазерных пучков с диа-

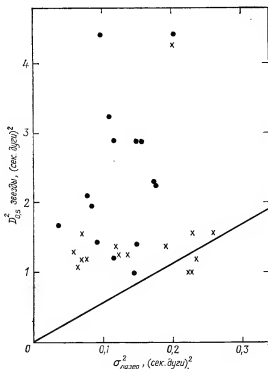


Рис. 17. Диаметр $D_{0,5}$ звездного изображения в зависимости от среднеквадратичного дрожания лазерных изображений σ . Прямая соответствует случаю, когда все искажения звездного изображения вызваны дефектами оптики и внутренним астроклиматом. Точки — измерения 28 августа 1980 г., крестики — 17 сентября 1980 г.

метром функции рассеяния точки. Для распределения Гаусса эта связь имеет вид $(D_{0,5})_{\text{лазер}} = 2,35 \times \sigma_{\text{лазер}}$. Большая часть дрожания лазерных пучков возникает в основных телескопах, а не в гиде. Если разные источники искажения изображения складываются квадратично, то

$$(D_{0,5})_{\text{звезда}}^2 = (D_{0,5})_{\text{оптика}}^2 + (D_{0,5})_{\text{лазер}}^2 + (D_{0,5})_{\text{другие причины}}^2.$$

На рис. 17 нанесены результаты измерений $(D_{0,5})_{\text{звезда}}$ в зависимости от $\sigma_{\text{лазер}}^2$. Ясно, что зачастую значительная или основная доля искажений возникает в телескопе, поэтому необходимы дальнейшие усилия по уменьшению температурных эффектов в телескопе и окружающем его пространстве.

6. Научные приборы МЗТ

6.1. Общие замечания

Навесные приборы МЗТ могут располагаться либо в квазикассегреновском фокусе, либо в одном из двух фокусов Нэсмита. Однако оптики для питания фокусов Нэсмита пока нет, поэтому все применяемые на МЗТ или запланированные на ближайшее время приборы работают в квазикассегреновском фокусе. Благодаря необычному освещению фокальной плоскости заполненным на 50 % пучком 1:9, состоящим из шести индивидуальных пучков (см. рис. 3), необходимы специальные приемы для оптимального сочетания приборов с телескопом. Метод, применяемый в спектрографе МЗТ, описан в работах [12, 13]. В табл. 5 приведен список 17 приборов, которые работают или вскоре будут работать на МЗТ. Некоторые из них делались специально для МЗТ и, следовательно, оптимально с ним согласованы (например, фотометр далекого ИК-диапазона, спектрограф МЗТ, инфракрасный пространственный интерферометр). Когда эти приборы будут закончены, они станут принадлежностью обсерватории МЗТ. Иные приборы строились для других телескопов и переделывались с учетом конфигурации зрачка МЗТ (например, быстрый фотометр, эшелый спектрограф обсерватории Маунт-Хопкинс), в то время как некоторые стыкуются с МЗТ без переделки.

В оставшейся части раздела более подробно описаны приборы, которые делаются специально для МЗТ.

6.2. Спектрограф МЗТ

Общие замечания. Основная задача современного спектрографа слабых объектов — количественная регистрация спектров звездообразных или небольших объектов с умеренной дисперсией и вычитанием фона неба. В прошлом десятилетии для этой цели применялись разнообразные электронные приемники излучения. Одним из первых и весьма эффективных устройств был сканер Робинсона—Уомплера с электронным считыванием экрана ЭОПа. Хотя основной режим работы «звезда минус небо» по-прежнему останется определяющим, при проектировании спектрографа грядущего десятилетия мы стремились полностью использовать преимущества двумерного формата светоприемников нового поколения. Панорамные приемники нужны, чтобы регистрировать спектры с кросс-дисперсией, обладающие хорошим разрешением и большой протяженностью по длинам волн, спектры протяженных объектов с длинной щелью и спектры нескольких объектов в поле зрения телескопа, полу-

Научные приборы для работы на МЗТ

Таблица 5

Прибор	Автор(ы)	Спектральный диапазон	Спектральное разрешение	Источ-ник
ПЗС-камера САО ¹	Дж. Гири, Г. Гурски, Р. Шилд, Т. Уикс	400—1000 им	~10	[34]
ПЗС-камера Аризонского ун-та	Р. Стокмен	400—1000 им	~10	—
Быстрый фотометр ¹	Дж. Мак-Гроу	300—900 им	2	—
8-цветный фотометр	Б. Зельнер	320—1050 им	~10	—
Фотометр ближнего ИК-диапазона	У. Хоффман, Ф. Лоу, Г. Рике	1—5 мкм	~10	[37]
Фотометр среднего ИК-диапазона	У. Хоффман, Ф. Лоу, Г. Рике	5—30 мкм	~10	[37]
ИК-фотометр	Дж. Хьючра	1,2—3,4 мкм	10	—
Оптический поляриметр	Р. Эйнджел, П. Стокмен	300—860 им	10	—
Спектрограф МЗТ	Р. Эйнджел, Д. Латам, Р. Веймани	300—1000 им	1000—6000	[1]
Z-приемник САО ¹	М. Дэвис, Д. Латам	400—800 им	1000	[8]
Эшелый спектрोगраф Маунт-Хопкинс ¹	Ф. Чаффи, Д. Латам	400—800 им	10 ⁴ —10 ⁵	[6]
Эшелый спектрोगраф станции Агассиз ¹	Ф. Чаффи, Р. Мак-Кроски	400—800 им	10 ⁴ —10 ⁵	—
Фурье-спектрометр ¹ САО	Н. Карлтон, У. Трауб	8—14 мкм	8000	—
Фурье-спектрометр умеренного разрешения Аризонского ун-та ¹	Г. Ларсон, У. Финк	0,8—5,6 мкм	4·10 ³ —2·10 ⁴	[33]
Фурье-спектрометр высокого разрешения Аризонского ун-та	Г. Ларсон, У. Финк	0,8—5,6 мкм	2·10 ⁵ —10 ⁶	—
Оптический спекл-интерферометр ¹	К. Хидж	300—800 им	5—250	—
Инфракрасный пространственный интерферометр (прототип) ¹	Ф. Лоу, Д. Мак-Карти	2—20 мкм	~10	[39, 37]

¹ Прибор успешно работал на МЗТ.

чаемые одновременно с помощью диафрагмы, отверстия в которой соответствуют положению объектов в фокальной плоскости. Разрабатывая спектрограф, мы, следовательно, хотели создать универсальный прибор, способный работать с линейными и панорамными приемниками, сохраняющий в то же время механическую стабильность и несложный в обращении.

Проектирование спектрографа для МЗТ, а не для обычного телескопа связано со специфическими трудностями и выгодами. Большой масштаб, $3,6''$ на 1 мм, означает, что спектрограф со стигматическим изображением даст отличное разрешение вдоль щели. При экранировании до 10% на объединителе пучков поле зрения равно $2'$ [4]. Была поставлена задача сделать спектрограф без виньетирования при длине щели 5 см, то есть $3'$. Когда строить изображение не нужно, то просто и выгодно сделать простой рассекающий изображение для фокуса $1:9$, воспользовавшись большим масштабом и особой геометрией зрачка. Мы избрали схему, впервые предложенную Фасты [12], она описана ниже. В обычных спектрографах щечки щели или входная диафрагма делаются отражающими и применяется чувствительная телевизионная система для отождествления звездного поля, фокусировки и установки наблюдаемого объекта в центр отверстия. Можно и гидировать офсетно по звездам поля, наблюдаемым на экране. На МЗТ в его современном виде телевидение применяется также для точного наложения изображений от шести главных зеркал путем коррекции наклона вторичных зеркал (см. разд. 5.5).

Ни один детектор пока не работает во всем оптическом диапазоне с достаточной эффективностью. Приходится еще рассчитывать на применение ЭОПов с магнитной фокусировкой или безлинзовым переносом в ультрафиолетовом и голубом участках спектра, где квантовая эффективность фотокатодов доходит до 25% . Мы решили, что из-за большого масштаба в фокусе размер спектра должен соответствовать наибольшему серийным ЭОПам с диаметром фотокатода 40 мм. Конструкция камеры должна допускать применение ЭОПов с магнитной фокусировкой, обладающих наилучшими параметрами по эффективности, разрешению и дисторсии. Считывание с экрана в перспективе будет осуществляться панорамным электронным прибором. Однако в качестве ближайшего практического шага планируется запустить спектрограф со счетчиком фотонов САО на ретиконе.

Оптическая схема. Поскольку два лучших приемника, которые будут использоваться — ЭОПы с магнитной фокусировкой и ПЗС-матрицы, — взаимно дополняют друг друга по спектральной чувствительности и весьма различны по формату, еще на

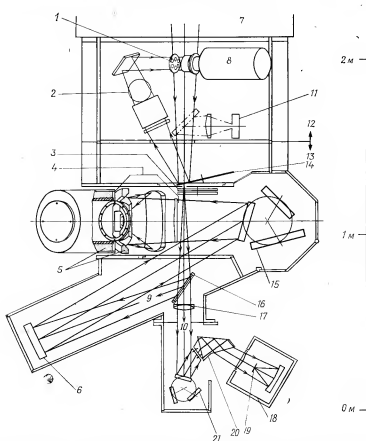


Рис. 18. Схема спектрографа МЗТ и офсетного гида. 1 — селектор зрачков; 2 — наклоненная стеклянная пластинка для проектирования мира; 3 — диски со светофильтрами; 4 — камера Шмидта 250 мм 1:1,0 с изломанным пучком; 5 — электромагниты; 6 — коллиматор — внеосевой параболоид; 7 — позиционный подшипник; 8 — телекамера для отождествления и гидирования; 9 — «синий» канал; 10 — «красный» канал; 11 — лампы для калибровки; 12 — узел офсетного гида; 13 — спектрограф; 14 — диафрагмы во вращающемся зеркале, расположенном в фокусе; 15 — турель с решетками «синего» канала; 16 — дихроичский светоделитель; 17 — линзовый коллиматор; 18 — криогенная камера Шмидта; 19 — ПЗС; 20 — призма постоянного отклонения; 21 — турель с решетками «красного» канала.

самых ранних этапах решено было разделить пучок за щелью дихроичским зеркалом и работать в красном и синем каналах одновременно. Ультрафиолетовый и синий свет отражается на большой коллиматор и оптическую систему, оптимизированную для 40-мм ЭОПа, а оставшийся свет проходит сквозь зеркало

к линзовому коллиматору меньшего размера и соответствующим оптическим элементам, согласованным с ПЗС (рис. 18). Тем самым можно сразу наблюдать весь спектр целиком.

Размер прибора определяется задачей согласовать его с форматом светоприемников. Лучшей камерой для работы с громоздким ЭОПом является камера Шмидта с изломанным пучком. В камерах этого типа поле хороших изображений не превосходит 10° . Таким образом, при размере приемника 40 мм нужно фокусное расстояние камеры не меньше 230 мм. Учитывая, что для максимального уменьшения нужно сделать камеру как можно более светосильной ($\sim 1:1$), мы задали в «синем» канале фокусное расстояние камеры 250 мм, а диаметр пучка 150 мм, что требует коллиматора с фокусным расстоянием 1,35 м. ПЗС-приемник «красного» канала невелик, меньше 18 мм по диагонали, и в проекте криогенной ПЗС-камеры приведенные выше размеры уменьшены вдвое. В этой камере нет изламывающего плоского зеркала, ПЗС-матрица крепится на растяжках прямо в фокусе. В обеих камерах масштаб изображения на приемнике равен 53 мкм на $1''$, что достаточно для разрешения пространственной структуры при качестве изображения лучше $1''$, если используются хорошие панорамные приемники.

Схема, показанная на рис. 18, была выбрана еще и потому, что в нее включены такие важные элементы, как призмы для кросс-дисперсии, которые можно по желанию вводить в «красный» или «синий» каналы. В обоих каналах пришлось установить решетки на турелях, чтобы быстро их менять и иметь возможность быстро переключаться от прямых панорамных наблюдений к спектральным. Таким образом, в «красном» канале можно поставить посеребренные зеркала вместо решеток и призмы и регистрировать прямые изображения с масштабом $20''$ на 1 мм либо ввести дисперсию решеткой или призмой, или тем и другим вместе, чтобы получить на ПЗС спектр с кросс-дисперсией.

Для «синего» канала имеются (или заказано) четыре решетки. При низкой дисперсии применяется решетка с 300 штрих/мм в первом порядке, она обеспечивает дисперсию 130 Å/мм и покрывает область спектра от 0,3 до 0,6 мкм с разрешением не хуже 10 Å. При заданном в спектрографе угле отражения 30° решетка с наибольшей возможной дисперсией может без сильного виньетирования иметь угол блеска 45° . Фирма «Гиперфайн инк.» нарезала такую решетку с 250 штрих/мм для работы с кросс-диспергирующей призмой, чтобы охватить весь спектр. Дисперсия меняется от 9 Å/мм в ультрафиолетовой области спектра до 13 Å/мм в синей, и с соответствующим светоприемником можно обеспечить разрешение гораздо лучше 1 Å .

В «красном» канале также будет несколько решеток различных дисперсий. В режиме с кросс-дисперсией предложено использовать решетку с углом блеска 21° и частотой штрихов 125 штрих/мм, с которой можно регистрировать на ПЗС всю область от 0,43 до 1,1 мкм, причем дисперсия будет меняться от 50 А/мм в синей области до 100 А/мм на волне 1 мкм. В обоих каналах порядки отстоят достаточно далеко друг от друга и не будут перекрываться при длине щели 10". Хватит места и для удлиненных изображений звезды, и для изображений участка неба, образуемых рассекателем, который описывается ниже.

Специфической особенностью конструкции является устройство для преобразования обычного круглого изображения звезды в тонкое и длинное, чтобы улучшить спектральное разрешение. При этом используется особая оптическая конфигурация МЗТ. Вторичные зеркала слегка смещают, чтобы выстроить шесть изображений в одну линию. Они формируются на расположенных в фокусе небольших сегментах линзы поля. Сегменты смещены вбок относительно своего начального положения в неразрезанной линзе, чтобы построенные ими изображения зрачков телескопов наложались друг на друга. Далее установлена отрицательная линза, которая строит мнимое изображение звезды, уменьшенное втрое по сравнению с фокальным, доводит светосилу совмещенного пучка до 1:9 и переобразовывает изображение зрачка снова в бесконечность. Этот метод впервые описал Фасти, подробнее он изложен в работе [1]. Мы назвали это устройство «выстраивателем изображения». На спектрографе будут два таких узла (один для звезды, другой для неба), и при желании их можно вводить в фокальную плоскость.

С хорошей телекамерой в фокусе можно наблюдать все поле зрения МЗТ, пригодное для гидирования (около $4'$) с секундным разрешением. Следовательно, решено было установить камеру по оси телескопа, но сделать линзы сменными, чтобы, если нужно, сильно увеличивать изображение в центре поля. Все изображение в поле диаметром 70 мм отражается плоским зеркалом, наклоненным на угол $12,5^\circ$ к оси телескопа. В качестве линзового коллиматора применен большой триплет Кука диаметром 125 мм, изображение вновь строится на телекамере одной из камерных линз, расположенных вблизи выходного зрачка коллиматора. Самая короткофокусная из них обеспечивает уменьшение в 5,4 раза, при котором все поле зрения уместится на формате телекамеры 11×15 мм. Чтобы различить между собой перекрывающиеся изображения, построенные разными телескопами, достаточно ввести диафрагмы в выходной зрачок, где имеются шесть изображений главных зеркал. Можно поступить иначе и посредством шести установленных по кругу

клиньев разделить изображения в телевизионном гиде, хотя на щели спектрографа они будут совмещены. В поле зрения проектируется мира в виде точечной искусственной звезды, с ее помощью можно будет точно совмещать изображения и гидировать, не мешая регистрации спектра.

Светоприемник. В первых наблюдениях на спектрографе МЗТ применялась система счета фотонов с ретиконом. Принцип действия такого приемника заключается в регистрации и центрировании отдельных фотоэлектронов с помощью диодной матрицы ретикон, установленной на выходе каскадного ЭОПа с большим усилением; впервые эту идею реализовал Шектман [56]. В приемник МЗТ внесено несколько серьезных усовершенствований по сравнению с первым вариантом САО, названным Z-приемником [8].

Сердцем светоприемника МЗТ является серийный ретикон, т. е. двойная линейка по 1024 элемента, вместе с соответствующей электроникой для быстрого считывания и обработки сигнала. Головка с ретиконом модульная, ее можно стыковать с разными ЭОПами. В первых наблюдениях на МЗТ использовалось три составленных вместе ЭОПа фирмы «Варо» с волоконно-оптическими шайбами, предназначенных для военных целей. Первый из них — 40-мм электростатический диодный инвертор Varo 8605, специально снабженный тонким фотокатодом S-20 для повышения чувствительности в синей области. Он состыкован через волоконно-оптические шайбы со стандартным ЭОПом Varo 8605, отобранным по наибольшей чувствительности в зеленой области, который в свою очередь соединен через волоконно-оптический уменьшитель (фокон), преобразующий 40-мм поле в 25-мм, с ЭОПом Varo 3603. Этот 25-мм МКП-инвертор со специальным малоинерционным люминофором соединен с ретиконом через специальную расщепленную волоконно-оптическую шайбу, изготовленную фирмой «Галилео инк.». Шайба практически устраняет «слепой» промежуток в 1,0 мм между диодными линейками и тем самым уменьшает влияние дисторсии, поскольку чувствительные элементы линеек ретикона изображаются на один диаметр выходного окна ЭОПа. Она к тому же сильно облегчает установку параллельности приемника и спектра, что немаловажно для эшелюного спектрографа. В этой системе мы не только тщательно отобрали первый ЭОП по максимальной чувствительности, но постарались также повысить число фотоэлектронов, попадающих на второй фотокатод от каждого события. Именно этим определяется форма амплитудного распределения импульсов, что в свою очередь влияет на предельную эффективность счета. Когда усиление первого каскада слишком мало, могут быть сосчитаны дополнительные

темновые электроны со второго фотокатода и может возникнуть послесвечение в тех местах, которые только что подверглись короткой засветке, например в линиях спектра сравнения, несмотря на вычитание кадров при обработке сигнала. Оба этих эффекта досаждали в ранних вариантах Z-приемника, но в светоприемнике МЗТ от них практически удалось избавиться. Спектральная чувствительность этой системы соответствует классическому фотокатоду S-20, но ультрафиолетовая граница проходит сразу за линиями H и K из-за поглощения во входной волоконной шайбе. Измерения показали, что максимальный абсолютный квантовый выход около 5000 \AA составляет почти 15 %.

Одна из наиболее обнадеживающих особенностей светоприемника МЗТ состоит в его улучшенной фотометрической однородности. Необработанные изображения с Z-приемника были промодулированы за счет неоднородности чувствительности почти на 50 %, причем основные компоненты этих флуктуаций соответствовали периодам в 2, 4 и 8 элементов разрешения. В новой системе периодические вариации на этих частотах малы, а общая среднеквадратичная модуляция равна примерно 3 %. Остаточные вариации чувствительности, вероятно, в основном связаны с неоднородностями фотокатодов. В идеальных условиях коррекция за них обеспечивает отношение сигнала к шуму не менее 200. На практике оно получается не таким хорошим, по-видимому, из-за того, что вследствие механического гнупия, магнитных и электростатических дрейфов освещаются несколько разные участки фотокатода, а также из-за неодинакового освещения щели при экспонировании звезды и лампы.

Качество работы. В мае—июне 1980 г. со спектрографом и приемником МЗТ было снято много спектров. В центре диодной линейки разрешение обычно достигало 35 мкм (полная ширина по уровню 0,5); на краях поля зрения ЭОПа оно было несколько хуже. С учетом уменьшения в фоконе это соответствует разрешению примерно 60 мкм на первом фотокатод. Наблюдения спектрофотометрических стандартов при ширине щели 1,5" показали, что квантовая эффективность системы в целом составляет около 1 %, включая потери света в атмосфере, на щели, в спектрографе и светоприемнике. Темновой ток обычно не превышал 10 импульсов на 1 $\text{см}^2/\text{с}$. Это в несколько раз больше, чем было на той же аппаратуре во время зимних испытаний на станции Агассиз, когда температура фотокатода была на 10 градусов ниже. В разд. 7.1 приведены некоторые научные результаты, полученные при использовании спектрографа МЗТ.

6.3. ИК-фотометр

Первый инфракрасный фотометр для МЗТ спроектировали и построили Дж. Рике, У. Хоффман и Ф. Лоу. Его схема показана на рис. 19. Приемник из антимолибдита индия охлаждается до 4,2 К [53] и будет работать в основном на волнах 2,2 и 3,4 мкм. Обратите внимание на длинные охлаждаемые коллиматоры 1:32, охлаждаемый объединитель пучков и дихроичский светоделитель (все это при температуре 77 К). Ожидается, что при работе с управляемыми сервоприводом качающимися вторичными зеркалами предельная чувствительность по фону будет реализована с очень малыми ($<3''$) диафрагмами. Кроме сменных охлаждаемых диафрагм в фотометре имеется большой охлаждаемый диск с фильтрами; может быть установлен и охлаждаемый круглый фильтр с переменной полосой пропускания. Таким образом, можно с высокой эффективностью выпол-

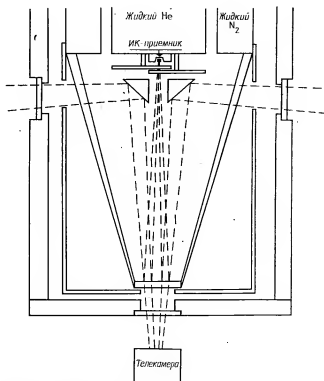


Рис. 19. Инфракрасный фотометр МЗТ.

нять широкополосные и узкополосные абсолютные фотометрические измерения.

Д. Мак-Карти и Ф. Лоу создают фотометр на диапазоны 10 и 20 мкм, в состав которого входят элементы, позволяющие уравнивать шесть оптических путей, то есть допускающие фазирование. При исключительно хорошем качестве изображения система должна работать как полностью сфазированная¹ с непрерывным накоплением и очень высоким отношением сигнала к шуму. Когда условия наблюдений хуже, можно обрабатывать данные менее эффективным методом спекл-интерферометрии. В том и другом случае угловое разрешение должно быть дифракционным.

6.4. ПЗС-камера САО

Безусловно, настоящий двумерный светоприемник с близким к единице квантовым выходом в широком спектральном диапазоне от оптического до ближнего ИК, малым шумом и хорошим разрешением очень нужен для прямой регистрации изображений и спектроскопии. Хотя ни один из серийных панорамных приемников сейчас не удовлетворяет всем этим требованиям, разработанные недавно большие твердотельные матрицы, в частности приборы с зарядовой связью (ПЗС), способны приблизиться к идеалу в недалеком будущем. В течение последнего года в САО работают над ПЗС-камерой с целью использовать имеющиеся сейчас устройства в астрономических наблюдениях, чтобы выявить определяющие в данном случае параметры новой технологии и по ходу дела, может быть, решить некоторые интересные научные задачи.

Получившаяся система состоит из направленного вверх дьюара, охлаждающего ПЗС до низкой температуры (обычно ниже 150 К) для уменьшения шума, и отдельного электронного блока, который по команде сканирует изображение, обрабатывает полученный видеосигнал и передает цифровую информацию в приборную ЭВМ. В настоящее время применяется большая ПЗС-матрица фирмы RCA, выпускаемая в двух модификациях: с освещением спереди и сзади. В ней имеется 512 рядов по 320 квадратных элементов размером 30 мкм. Получается приемник форматом $9,6 \times 15,4$ мм — один из самых крупных среди современных твердотельных устройств для регистрации изображений. Измеренный квантовый выход достигает до 75 %, и у освещаемого сзади ПЗС в диапазоне длин волн от синего до ближнего инфракрасного он, вероятно, меняется слабо.

¹ То есть с разностями хода много меньше λ . — Прим. перев.

Хотя у данного ПЗС элементы разрешения велики, он все еще вряд ли годится для прямой регистрации изображений на МЗТ с масштабом 278 мкм на 1" без какого-нибудь оптического уменьшения, за исключением, быть может, случаев исключительно хорошего качества изображения. Сейчас мы пытаемся приспособить простые линзовые системы для согласования элемента разрешения с размером турбулентного диска, чтобы не ухудшать сигнал за счет избыточного количества элементов. В конце концов, может быть, для этой цели действительно лучше будет разработать специальную оптику, чтобы получить более резкие изображения в более широких участках спектра, свести до минимума рассеянный свет, а также, возможно, модифицировать существующий объединитель пучков для расширения поля зрения.

Пока неясно, подойдут ли ПЗС-приемники фирмы RCA или любые другие из имеющихся сейчас для регистрации спектров. В этом случае приемник должен обладать исключительно низким шумом считывания наряду с высокой эффективностью переноса заряда при малых уровнях сигнала, чтобы не потерять пространственное разрешение. Часть экспериментов с разработанной камерой будут иметь целью выявление трудностей в этом направлении в надежде, что полученная информация пригодится разработчикам будущих усовершенствованных твердотельных приемников изображения для повышения их качества по этим важным параметрам.

7. Астрономические исследования с МЗТ

Трудно описывать возможные в будущем астрономические исследования на инструменте, когда он еще не полностью вступил в строй и когда полный набор его научных приборов еще даже не определен и тем более не построен. Тем не менее некоторые уникальные свойства МЗТ и характеристики астроклимата в месте его установки указывают вероятное направление работ на этом телескопе. Мы по очереди опишем несколько приборов, работающих или вскоре начинающих работать на МЗТ, и наблюдательные программы, которые будут на них осуществляться, а также некоторые из результатов, уже полученных за недолгий период работы МЗТ.

7.1. Спектроскопия

Как указано в разд. 6.2, на МЗТ спектрографы могут работать либо в обычном режиме, когда все шесть изображений совмещены, либо когда изображения расположены вдоль щели

«в линейку». До настоящего времени применялся только обычный режим, не считая весьма предварительных проб с эшелъным спектрографом обсерватории Маунт-Хопкинс, однако и в этом режиме уже получены некоторые интересные результаты.

После открытия в 1979 г. Уолшем и др. [63] двойного квазара (0957 + 561 А, В) на спектрографе с Z-приемником был установлен верхний предел на разность красных смещений абсорбционных линий компонентов А и В (около 15 км/с), что явилось серьезным аргументом в пользу предложенной Уолшем и др. гипотезы гравитационной линзы [64]. Во время первых испытаний спектрографа МЗТ в мае 1980 г. Веймани и др. [65] открыли тройной квазар 1115 + 08 — второй пример гравитационной линзы (рис. 20). В то время наблюдался также магнитный белый карлик АМ Геркулеса в редкий момент «выключенной» фазы [36] и удалось зарегистрировать магнитное поле напряженностью 20 МГс по зеемановскому расщеплению водородных линий (рис. 21). Благодаря отличному астроклимату обсерватории, малому виньетированию в широком спектральном диапазоне и очень хорошему разрешению спектрограф приспособлен для спектроскопии слабых объектов с умеренным разрешением, где важна ширина регистрируемого участка спектра.

Уникальной характеристикой МЗТ является режим «линейного» изображения на щели при работе со спектрографами. В сочетании с высокой частотой появления изображений качеством в 1" и лучше и применением эшелей это обеспечивает рекордное пропускание щели спектрографа даже при довольно высоком спектральном разрешении. Идет предварительное проектирование эшелъного спектрографа для МЗТ с 15-см решеткой R-2 с углом блеска 63°, питающей 75-см камеру, которая согласует входную щель в 1" с элементом разрешения приемника размером 25 мкм, что соответствует разрешению 5 км/с по уровню 0,5¹. При этом щель будет часто пропускать большую часть собранного света. В обычном кудэ-спектрографе при среднем качестве изображения подобное разрешение соответствует пропусканию щели около 5 % [9]. Если опять взять для примера абсорбционные линии квазаров, то можно будет наблюдать объекты с $m_V \approx 16,5$ с таким разрешением, которого, судя по имеющимся на сегодня наблюдениям на волне 21 см, достаточно для полного разрешения профилей линий и уверенного анализа химического состава.

¹ Имеется в виду спектральное разрешение, соответствующее доплеровской скорости 5 км/с, то есть $6 \cdot 10^4$. — Прим. перев.

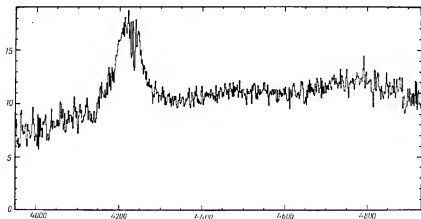


Рис. 20. Спектр С-компонента тройного (пятерного) квазара PG1115+08A. По горизонтальной оси — длина волны в ангстремах, по вертикальной — скорость счета.

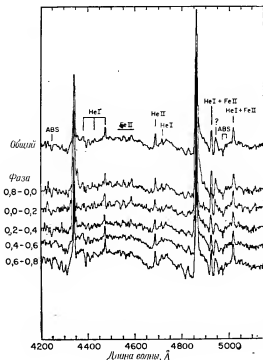


Рис. 21. Спектры AM He I в разных фазах. Обратите внимание на сильные и широкие зеемановские компоненты линии поглощения H β на волнах 465 и 480 нм, образованные магнитным полем 20 МГс. Материал любезно предоставили Дж. У. Либерт, Д. У. Латэм и К. Г. Штайнер.

Как это ни удивительно, теперь мы можем пытаться снимать спектры объектов величины $16,5^m$ с разрешением 5 км/с, хотя всего 20 лет назад, до освоения ЭОПов, такого разрешения можно было достичь на существующих кудэ-спектрографах только для объектов, примерно на 9 величин более ярких [9].

7.2. Получение прямых изображений

Астрономические наблюдения с регистрацией прямых изображений *не принадлежали* к числу главных задач, для которых предполагалось использовать МЗТ. В этой связи любопытно отметить, что одним из наиболее замечательных последних ре-

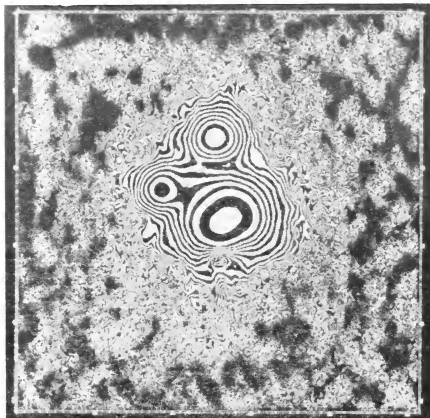


Рис. 22. Изображение тройного (пятерного) квазара PG1115+08A с угловым разрешением $0,6''$. Расстояние между компонентами около $2''$. Материал любезно предоставил К. Хидж.

зультатов явилась регистрация на видиконе с ЭОПом прямого изображения тройного квазара, на котором отчетливо видно удлинение (начинающееся разделение?) самого яркого компонента (рис. 22). Это изображение получено с помощью только одного из шести телескопов, чтобы добиться наилучшего разрешения. Секундные экспозиции сдвигали до совмещения центров и потом суммировали, чтобы увеличить отношение сигнала к шуму, что позволило довести $D_{0,5}$ до $\sim 0,6''$. Чтобы получить максимальное отношение сигнала к шуму, нужно использовать все шесть телескопов, но изображения, конечно, не обязательно должны совпадать. Для отделения реальной структуры объекта от остаточных эффектов аберраций и турбулентности даже лучше будет разделить изображения на приемнике и потом уже взаимно наложить их в электронике. Был построен прибор, основанный на том же принципе, что и «линейный» режим спектроскопии, в котором шесть одинаковых небольших участков поля зрения, по одному от каждого телескопа, проектируются в конфигурации 3×2 на одну телекамеру с ЭОПом, причем излучение фона неба не складывается. В настоящее время с этим устройством выполняется программа систематического поиска кратных изображений у большего числа квазаров. Другие наблюдательные программы с ПЗС-камерой САО также направлены на получение высококачественных изображений малых участков неба.

7.3. Оптическая спекл-интерферометрия

Метод спекл-интерферометрии позволяет получать информацию о параметрах изображения вплоть до дифракционного предела разрешения телескопа (см. обзор [32]). Очень важно регистрировать сигнал за такое время, в течение которого положения зерен («спеклов») в изображении неизменны, то есть за малые доли секунды. На практике это достигается считыванием на видеоленту сигнала телекамеры, снабженной ЭОПом с большим усилением [20].

Применение этого метода на МЗТ особенно интересно по двум причинам. Во-первых, благодаря хорошему астроклимату места установки МЗТ значительная доля энергии изображения часто бывает сконцентрирована в малом числе зерен, поэтому предельная звездная величина метода может быть несколько выше (до $m_V \approx 18$), чем думали вначале. Во-вторых, проведенные до сих пор опыты с парами противоположных зеркал указывают на стабильность несущей оптику конструкции, достаточную для получения спекл-изображений при когерентном сложении всех шести пучков. Таким образом, дифракционная картина будет почти такая же, как в одном 6,9-м телескопе, и будет содержать

информацию на масштабах вплоть до $\sim 0,02''$. Это открывает разнообразные перспективы для исследований в таких направлениях астрономии, как изучение тел Солнечной системы (например, наблюдения спутника Плутона или измерение диаметров астероидов), звездная астрономия (изучение протопланетных дисков, внутренних областей околозвездных оболочек) и внегалактическая астрономия (структура ядер сейфертовских галактик, поиск расщепления на доли секунды дуги изображений ярчайших квазаров).

7.4. Исследования в ИК-диапазоне

С самого начала МЗТ проектировался с мыслью об ИК-наблюдениях. Поэтому детали крепления вторичных зеркал обладают минимальной излучающей поверхностью и имеется набор вторичных зеркал меньшего размера для работы в ИК-области. Инструмент хорошо приспособлен для выполнения многих наблюдательных задач в этом диапазоне.

Уже накоплен значительный опыт по применению пар противоположных зеркал в качестве интерферометра Майкельсона (см. разд. 5.7). Контраст полос измеряют быстрым сканированием полос по расположенному перед приемником растру. Так была определена функция видности на данной базе для ряда поздних гигантов и сверхгигантов в диапазоне 2—10 мкм. Недостаток метода Майкельсона заключается в том, что в определенный момент времени измеряется всего один фурье-компонент изображения. В принципе в ИК-диапазоне можно регистрировать прямые изображения и наблюдать методом спекл-интерферометрии точно так же, как в оптическом диапазоне. На практике же до тех пор, пока не появится панорамный ИК-приемник, применяется несколько иной способ: изображения очень быстро сканируют по щели, расположенной перед приемником, и анализируют одномерный спектр мощности сигнала; собственную частотно-контрастную характеристику телескопа и атмосферы находят по квазиодновременным наблюдениям соседнего точечного источника. Как уже говорилось, этим методом были разрешены поздние сверхгиганты и вероятные протопланетные диски. Должны быть доступны наблюдению детали ИК-структуры ядра NGC 1068. Было высказано интересное предложение: сфазировать МЗТ на волне 20 мкм не только с целью повышения разрешения, но и для того, чтобы получить дифракционное изображение, как в 6,9-м телескопе, и тогда можно будет сделать диафрагму фотометра очень малой, сведя фон до абсолютного минимума. Вскоре начнет работать фотометр с шестью качающимися в фазе инфракрасными зеркалами; в диапазоне 1—3 мкм приемником будет InSb, а в диапазоне

5—20 мкм — болометр. На волне 2 мкм наблюдению легко доступно большинство квазаров, а у ярчайших из них могут быть получены спектры с низким разрешением. Вероятно, можно будет измерить и потоки от гигантских эллиптических галактик с $z > 1$. На спектрометре с круговым фильтром с переменной полосой пропускания будут наблюдаться широкие эмиссионные линии активных ядер галактик и ярчайших квазаров. Для изучения спектральных особенностей особо интересных красных объектов (например, MWC 349) и процессов звездообразования (например, спектров звездных объектов, погруженных в комплекс ρ Orh, вблизи 2 мкм) будут использоваться фурье-спектрометры с разрешением 50—25 км/с.

8. Многозеркальные телескопы будущего

Будущие сверхгигантские телескопы и на земле, и в космосе почти наверняка будут многозеркальными. Необходимость выводить телескоп в космос не очень крупными частями не позволит применить монолитное главное зеркало. Даже в этом случае стоимость такого телескопа в настоящее время недопустимо высока.

Мы в силах создать сверхгигантский наземный телескоп и он будет исключительно полезен. Одна секунда ночных наблюдений на 15-м наземном телескопе и на 2,5-м космическом стоит примерно одинаково, хотя на земле общие и ежегодные затраты, а также количество темного времени на порядок меньше. Наземный телескоп окажется лучше космического для таких задач, как спектральные наблюдения любых объектов ярче фона неба, изучение протяженных объектов малой поверхностной яркости, спектроскопия нескольких объектов (например, членов скопления галактик), спектральные наблюдения в диапазоне 1—3 мкм, где чувствительность ограничена внутренними шумами приемников, наблюдения с высоким угловым разрешением в инфракрасном и оптическом (спекл-интерферометрия) диапазонах, быстрая разработка новой аппаратуры. Он пригодился бы для субмиллиметровой астрономии (на волне 0,3 мм). При диаметре турбулентного диска в доли угловой секунды он успешно конкурировал бы с космическим телескопом в решении задач, ограниченных фоном неба в оптическом диапазоне. Многие из этих возможностей подробно исследованы в работах [10, 58]. В работе [66] приведены некоторые графики, иллюстрирующие преимущества наземного телескопа при наблюдении сразу нескольких объектов.

В сборнике [21] содержится несколько предложений о постройке гигантских телескопов с составными объективами. В настоящее время некоторые надежды на строительство теле-

скопов с составными объективами диаметром от 10 до 25 м имеются в СССР, в Европейской Южной обсерватории, и в США, в частности в штате Калифорния. Обсерватория Китт-Пик совместно с университетами Аризоны, Калифорнии и Техаса организует общую программу технических исследований с целью создания телескопа диаметром около 15 м. Считается, что не стоит пытаться сделать монолитное зеркало такого размера, а системы из отдельных телескопов и чаши не годятся для ИК-наблюдений. Таким образом, одна из главных задач программы технических исследований состоит в обосновании выбора между многозеркальными телескопами типа А и типа Б (тип А — сегментированное главное зеркало, тип Б — составной объектив). В программе ТСП (телескоп следующего поколения) на Китт-Пике изучались оба варианта размером 25 м — подвижная чаша и большой МЗТ. Дальнейшие исследования систем типа А ведет в Калифорнийском университете Дж. Нельсон со своими сотрудниками [47], а большая система типа Б исследовалась в Аризонском университете.

В Калифорнийском университете занимаются разработкой главного зеркала, которое сохраняло бы свою форму независимо от приложенных сил. В нем измеряются взаимные положения 1,4-м сегментов, и позиционные приводы исправляют любые ошибки. Созданы датчики и приводы, а также метод изгиба и полировки точных внеосевых параболоидов, с успехом испытанный на круглом прототипе диаметром 0,35 м. С другой стороны, в исследованиях, идущих в Аризонском университете, проверяются возможности активной оптики в рамках современных сведений о параметрах астроклимата. Изучены также применимость световодов и разбиение телескопов на «субапертуры» с целью добиться наибольшей эффективности и наименьших изображений в оптическом диапазоне за счет мгновенных коррекций наклонов волнового фронта. В обеих группах рассматривались некоторые методы, применимые к системам обоих типов. Опыт работы на МЗТ указал на два важных усовершенствования, которые стоит сделать в будущих инструментах. Во-первых, попытки фазирования телескопа для ИК-интерферометрии позволяют надеяться, что можно сделать МЗТ, где все элементы будут работать в фазе и предел разрешения будет обусловлен дифракцией на полной апертуре, а не на ее составных частях. Во-вторых, мы наблюдали, как отдельные изображения перемещаются из-за дифференциального дрожания, напоминая рой пчел. Мы думаем, что можно будет осуществить быструю юстировку по звездным изображениям и совместить их, и тогда разрешение будет выше, чем у жесткого телескопа той же площади.

Системы типов А и Б обладают различными недостатками и достоинствами, поэтому в настоящее время трудно сделать выбор. В основе системы типа А заложено облегченное за счет тонких сегментов главное зеркало, и эта экономия веса распространяется на весь телескоп. Чтобы еще сильнее сэкономить, можно уменьшить телескоп и купол, увеличив светосилу. Тогда сильно ужесточаются допуски на юстировку, но это не проблема, если юстировать по изображению звезды. Важнее другое: трудно станет обеспечить большое поле высококачественных ахроматических изображений с малыми потерями света. Сейчас удовлетворительного качества можно достичь при светосиле главного зеркала 1:2,0; в более изощренной оптической схеме ее, вероятно, можно будет довести до 1:1,6. При той же площади зеркала в системе типа Б труба гораздо короче и купол вокруг нее можно сделать меньше. Если стоимость купола пропорциональна его размеру в степени 2,5, то минимальный купол системы типа А светосилой 1:2,7 обойдется вдвое дороже, чем купол восьмизеркальной системы типа Б светосилой 1:2,7. В существующих обсерваториях на купол приходится, как правило, около трети стоимости всего проекта, так что этим не стоит пренебрегать. В принципе размер системы типа Б можно уменьшить для сокращения веса и стоимости, но пока еще неясно, одинаковы ли в обоих типах требования к жесткости и частотным свойствам трубы.

В системе типа Б с главными зеркалами 1:2,7 легче обеспечить большое поле хороших изображений. Для регистрации визуальных изображений можно, вероятно, воспользоваться несколькими ПЗС-приемниками с электронным суммированием их сигналов, так что использование телескопов по отдельности не приводит к проигрышу. При одновременной спектроскопии нескольких объектов можно с таким же успехом протянуть световоды от отдельных фокусов, как и от одного. Таким образом, для широкоугольных оптических наблюдений больше подходит система типа Б. Однако при фазировании поля зрения для когерентных наблюдений в системе типа Б даже при малом размере поля есть небольшое экранирование, и в некоторых задачах это может вызвать трудности. Значит, для фазирования в большом поле зрения тип А лучше. Если элементов много, то начальное фазирование системы типа А занимает очень много времени. Однако в системе типа Б на фазирование влияет поведение конструкции, и, хотя оно выполняется быстро, его нужно чаще повторять. Не исключено, что измерение расстояний с лазерными интерферометрами может устранить эти трудности в системах обоих типов.

Основная проблема связана с главным зеркалом: до какой степени нужно управлять его фигурой «вслепую», а не по юсти-

ровочной звезде или же можно непрерывно пользоваться опорной звездой в поле зрения? Для слепой юстировки необходимо, вероятно, делать зеркало из очень стабильных материалов типа стекла со сверхнизким коэффициентом теплового расширения или ситалла. Такие заготовки довольно дороги, что может повысить стоимость и время изготовления системы типа Б. С другой стороны, для такой системы с частично адаптивной оптикой вполне подойдут тонкие или сотовые зеркала из пирекса, что заметно ее удешевит. Для полировки в изогнутом состоянии сотовые заготовки не годятся, сегментами зеркала типа А могут служить только очень тонкие сплошные диски. К тому же допуски на фокусное расстояние здесь столь жесткие, что только по этой причине придется изготавливать зеркала из ситалла. До сих пор делались лишь небольшие сотовые заготовки из пирекса, и эта технология пока не отработана.

В сфазированных системах типов А и Б дифракционные картины совсем разные, причем в первом случае картина больше похожа на дифракционный диск сплошной круглой апертуры. При идеальном качестве оптики все телескопы с одинаковой площадью зеркал должны иметь одинаковую интенсивность в центре своего дифракционного изображения. Значит, с увеличением размера системы с несплошным зеркалом и ее углового разрешения все меньше энергии попадает в центральный максимум, и можно предполагать, что произведение энергии, заключенной в пределах первого темного кольца, на квадрат разрешения должно быть в разных системах одинаковым. В табл. 6 приводятся результаты расчета этих величин и сравниваются отношения сигнала к шуму в ИК-телескопе с оптимальной малой диафрагмой. Нетрудно видеть, что есть разница между системами типа А и типа Б: при ИК-наблюдениях у первых будет несколько большее отношение сигнала к шуму и несколько меньшее разрешение. В анализе перспектив трудно учитывать эти сравнительно небольшие различия. На волнах короче 3 мкм концентрация света будет определяться астроклиматом и заметной разницы между системами не будет. Инфракрасные наблюдения с наивысшей чувствительностью будут выполняться из космоса, а наземные измерения понадобятся для уточнения положения, структуры и переменности источников. Здесь выгодно будет высокое разрешение. С другой стороны, для ИК-спектроскопии важнее, вероятно, концентрация энергии.

Если окажется, что одна из систем намного дешевле или же при разработке одного типа встретятся серьезные трудности, что маловероятно, то выбор окажется нетрудным. В момент же написания этих строк выбор между двумя типами представляется не столь безболезненным. Таким образом, нам ясно, что буду-

Таблица 6

Дифракционные картины для телескопов типа А и разных конфигураций типа Б¹

Система зеркал	Доля энергии, собираемой в пределах 1-го темного кольца ²	Разрешение (по центру картины)	Максимальное отношение сигнал/шум при ИК-наблюдениях
<i>Тип А (сегментированные зеркала)</i>			
Один круглый диск	0,836	1,0	1,0
<i>Тип Б (несколько зеркал)</i>			
Шесть зеркал в вершинах правильного шестиугольника (МЗТ)	0,620	1,25	0,836
Восемь зеркал по сторонам квадрата [66]	0,580	1,28	0,85
Семь зеркал в вершинах правильного семиугольника	0,554	1,28	0,83

¹ Промежутки между зеркалами равны 0,2 их диаметра.

² Для систем типа Б интегрирование проводилось только до 3-го нуля дифракционных картин отдельных телескопов.

шее принадлежит либо телескопу типа А с сегментированным главным зеркалом, либо многозеркальному телескопу типа Б, но на вопрос, который из них лучше, ответа пока нет.

9. Выводы

С постройкой многозеркального телескопа ночная оптическая астрономия получила новый крупный и современный инструмент. МЗТ используется не только для сбора высококачественной астрономической информации, но и для отработки новой технологии астрономического телескопостроения. Вызывает удивление тот факт, что такой телескоп, как МЗТ, со множеством отличий от традиционной технологии строительства оптических телескопов, действительно стал высококачественным и крайне полезным инструментом за очень короткое время после его номинального ввода в строй. Заслуга в этом принадлежит множеству компетентных и преданных своему делу ученых, инженеров и других специалистов, которые участвовали и продолжают участвовать в проектировании телескопа и осуществлении замысла. В трудах симпозиума, посвященного открытию МЗТ (см. [1]), перечислено более 340 лиц, связанных с проектом. Мы не собираемся приводить столь полный список.

Однако нам бы очень хотелось особо отметить тех немногих, которые внесли весомый вклад в создание МЗТ и посвятили постройке этого уникального инструмента большую часть своей творческой жизни, но не входят в число соавторов этой главы: Т. Е. Хоффмана, А. Мейнела, М. Рида, Г. Сэнджера, Ф. Уиппла и Дж. Т. Уильямса. Построить МЗТ очень помогли такие талантливые администраторы, как Дж. Грегори и П. Созански из САО и Р. Кассандер и А. Уивер из Аризонского университета. Любовь и преданность делу этих и других участников проекта лежит в основе успеха многозеркального телескопа. Мы с благодарностью отмечаем помощь М. Грина, В. Терси и Г. Мак-Лафлин при подготовке этой рукописи.

Часть представленных здесь материалов основана на работах, финансируемых Национальным научным фондом по дотациям AST 76-20 822, AST 76-21 732 и AST 79-25 421.

Литература

1. Angel J. P. R., Hilliard R. L., Weymann R. J. The MMT and the future of ground based astronomy, ed. T. C. Weekes, SAO Special Report, No. 385, 87—118, 1979. (Далее цит. как SAO Rept. 385.)
2. Barr L. Optical and infrared telescopes for the 1990s, ed. A. Hewitt, pp. 23—53, 1980. [Часть сборника переведена на русский язык: Оптические и инфракрасные телескопы 90-х годов. Под ред. А. Хьюнт.— М.: Мир, 1983.] (Далее цит. как Telescopes for 1990s.)
3. Basov N. G., Dimov N. A., Gvozdev M. I., Kokurin Yu. L., Lomakin V. N., Steshenko N. V., Tarasov G. P., Ustinov N. D., Vasiljev A. S., Zarubin P. V. SAO Rept. 385, 185—189, 1979.
4. Beckers J. M. MMT Tech. Rept. No. 1. 1980.
5. Barke J. J., Kurchoff W. Sky and Telescope, 284—286, Nov. 1968.
6. Chaffer F. H. Astrophys. J., 189, 427—440, 1974.
7. Carleton N. P., Hoffman W. F. Physics Today, Sept. 1978, 30—37.
8. Davis M., Latham D. W. Proc. Soc. Photo-Opt. Instr. Eng., 172, 71—76, 1978.
9. Dunham T. Jr. Vistas in Astronomy, 2, 1223, 1956.
10. Faber S. A scientific case for a 10 meter telescope. Preprint. 1980.
11. Fallier J. E. Optical telescopes of the future, Proc. ESO Conf., ed. F. Pacini, W. Richter, R. N. Wilson, pp. 301—311, 1978. [Имеется русский перевод: Оптические телескопы будущего.— М.: Мир, 1980.] (Далее цит. как Opt. telescopes.)
12. Fastie W. G. J. Opt. Soc. Am., 51, 1472, 1961.
13. Fastie W. G. Applied Optics, 6, 397—402, 1967.
14. Fotesco G., Heilbrunn G. UK Patent No. 21456, 1909.
15. Grainger J. F. SAO Rept. 385, 199—207, 1979.
16. Green J. R. Literature search on Multiple objective telescopes. Steward observatory, 1979.
17. Grundmann W. A., Richardson E. H. Telescopes for the 1990s, pp. 11—22, 1980.
18. Hall D. N. B. Opt. telescopes, pp. 239—249, 1978.
19. Handbury Brown R. Sky and Telescope, Aug. 1964, 64—69. См. также Space Physics and Radio Astronomy, ed. H. Messel, S. T. Butler, Chap. 5.
20. Hege K., Hubbard E. N., Strittmatter P. A. Proc. Soc. Photo-Opt. Instr. Eng., 264, 29—37, 1980.

21. *Hewitt A. ed.* Optical and Infrared Telescopes for the 1990s. Proc. KPNO Conf., 1980. (Сокр. Telescopes for the 1990s.)
22. *Hoffman T. E.* Opt. telescopes, pp. 185—208, 1978.
23. *Hoffman T. E.* SAO Rept. 385, 23—26, 1979.
24. *Horn-d'Arturo G.* Publ. Oss. Astron. Univ. Bologna, 3(3), 19—35, 1935.
25. *Horn-d'Arturo G.* ibid. 5(11), 3—15, 1950.
26. *Horn-d'Arturo G.* J. Brit. Astron. Assoc., Jan. 1953, 71—74.
27. *Horn-d'Arturo G.* Publ. Oss. Astron. Univ. Bologna, 6(6), 1—18, 1955.
28. *Horn-d'Arturo G.* ibid. 6(18), 1—6, 1956a.
29. *Horn-d'Arturo G.* Optic, 13, 6, 254—258, 1956b.
30. *Ingalls A. G.* Scientific American, Jan. 1951, 60—63.
31. *Jacchia L.* Sky and Telescope, 55, 100—102, 1978.
32. *Labeyrie A.* Ann. Rev. Astron. Astrophys., 16, 77—102, 1978.
33. *Larson H., Fink U.* Applied Optics, 14, 2085—2095, 1975.
34. *Leach R. et al.* Publ. Astron. Soc. Pacif., 1980, в печати.
35. *Learner R. C.* Opt. telescopes, pp. 275—288, 1978.
36. *Liebert J., Latham D. W., Steiner K. G.* Preprint, 1980.
37. *Low F. J.* SAO Rept. 385, 79—86, 1979.
38. *Low F. J., Rieke G. H.* The instrumentation and techniques of infrared photometry. Methods of experimental physics, vol. 12, Astrophysics. Part A: Optical and Infrared. New York: Academic, 1974.
39. *McCarthy D. W., Low F. J., Howell R.* Opt. Engineering, 16, 569—574, 1977.
40. *McDonough D. F.* MMTO Tech. Rept. No. 5, 1980.
41. *Meinel A. B.* Applied Optics, 9, 2501—2504, 1970.
42. *Meinel A. B.* Opt. telescopes, pp. 289—299, 1978.
43. *Meinel A. B.* SAO Rept. 385, 9—22, 1979.
44. *Meinel A. B., Meinel M. P.* Telescopes for the 1990s, 95—107, 1980.
45. *Mertz L.* Optical instruments and telescopes Conf., Reading, England, ed. J. H. Dickson, pp. 507—513. Reading, England: Oriel, 1970.
46. *Mertz L.* Telescopes for the 1990s, 957—969, 1980.
47. *Nelson J.* Telescopes for the 1990s, 11—22, 1980.
48. *Oort J. H.* Astron. Astrophys., 1980, в печати.
49. *Oxmantown, Lord.* Edinburgh Journal of Science, IX(17), 25, 1828.
50. *Radan R. E., Ulich B. L.* MMTO Tech. Rept. No. 6, 1980.
51. *Reed M. A.* Opt. telescopes, pp. 209—226, 1978. См. также SAO Rept. 385, 65—78, 1979.
52. *Richardson E. H., Grundmann W. A.* Opt. telescopes, pp. 251—268, 1978.
53. *Rieke G. H.* Applied Optics, 1980, в печати.
54. *Ruda M., Turner T. J.* MMTO Tech. Rept. No. 2, 1980.
55. *Shannon R. R.* SAO Rept. 385, 57—64, 1979.
56. *Shectman S. A.* Publ. Astron. Soc. Pacif., 88, 960—965, 1976.
57. *Steshenko N. V.* SAO Rept. 385, 191—197, 1979.
58. *Strittmatter P. A.* Telescopes for the 1990s, pp. A1—A66, 1980.
59. *Synge E. H.* Phil. Mag., 10, 353—360, 1930. См. также J. Brit. Astron. Assoc., Annual Rept. 40, 406, 1930.
60. *Thomas W.* US Patent No. 3507547, 1965.
61. *Ulich B. L., Riley J. T.* MMTO Tech. Rept. N 4, 1980.
62. *Vaisala Y.* Urania Barcelona, 220, 89—93, 1949.
63. *Walsh D., Carswell R. F., Weymann R. J., Nature*, 279, 381—384, 1979.
64. *Weymann R. J., Chaffee F. H., Davis M., Carleton N. P., Walsh D., Carswell R. F.* Astrophys. J. Lett., 233, L43—L46, 1979.
65. *Weymann R. J., Latham D. W., Angel J. R. P., Green R. F., Liebert J. W., Turushek D. A., Turushek D. E., Tyson J. A., Nature*, 285, 641, 1980.
66. *Woolf N., Angel J. R. P.* Telescopes for the 1990s, pp. 1062—1150, 1980.

КОСМИЧЕСКИЙ ТЕЛЕСКОП

Ч. Р. О'Делл¹

1. Введение

В противоположность другим статьям этой монографии здесь речь идет о еще строящейся обсерватории. И все-таки статья нужна в этой книге, потому что космический телескоп (КТ) должен сыграть в астрономии такую же роль, как система VLA, многозеркальный телескоп и обсерватория им. Эйнштейна, и стать ведущим оптическим телескопом 80-х годов. Нельзя



Рис. 1. Так будет выглядеть космический телескоп на орбите в начале 1985 г. В действительности крышку на апертуре не будут открывать, пока рядом находится «Спейс шаттл».

¹ NASA/Marshall Space Flight Center, Alabama 35812, USA.

пока привести красивых снимков (рис. 1 выполнен художником), с этим придется подождать до 1985 г., но я могу рассказать об ожидаемом качестве его работы, а читатель сможет сделать выводы о взаимодополняющей роли космического телескопа по сравнению с другими инструментами. Так как этот проект гораздо обширнее и сложнее любого другого астрономического предприятия, имеет смысл выяснить, как же удастся довести его до завершения.

КТ обеспечит гигантский шаг вперед в возможностях оптической астрономии. Невозможно охарактеризовать качество многоцелевого инструмента немногими параметрами, но если это сделать, то мы увидим, что же сулит его использование. Способность КТ регистрировать изображения представляется недостижимой при наземных наблюдениях слабых объектов. Способность изучать слабые объекты будет гораздо выше, чем даже у самых крупных инструментов, которые придут на смену многозеркальному телескопу. Наконец, неизвестно иного способа расширения спектрального диапазона, кроме выхода за пределы земной атмосферы.

Во втором разделе этой главы рассмотрены основные ограничения наземных телескопов. В разд. 3 прослежена история КТ с момента рождения идеи до начала его постройки, за период более 50 лет. В разд. 4 представлены инженерные соображения, повлиявшие на возможный облик КТ, а в разд. 5 описан реально создаваемый космический аппарат. Научные приборы, преобразующие полученные телескопом изображения в полезную научную информацию, обсуждаются в разд. 6. КТ представляет собой дистанционно управляемую обсерваторию со специфическими требованиями и приемами работы, описанными в разд. 7. Конечной целью всей этой деятельности являются научные исследования, современное мнение о которых я изложу в разд. 8.

2. Ограничения наземных оптических телескопов

Есть три способа измерить качество оптического телескопа: по его способности строить изображение, по его способности обнаруживать слабые объекты и по его спектральному диапазону. В данном разделе описываются явления, естественно ограничивающие качество наземных телескопов по этим параметрам.

Способность формировать прямые изображения на подходящих светоприемниках характеризуют наилучшим качеством изображения и величиной полезного поля зрения. Наилучшие изображения находятся обычно на оси, и имеется некоторая зона вокруг нее, в радиусе которой изображения еще неотличимы по качеству от осевых. Этот радиус практически и определяет

размер поля зрения. Теоретический предел качества изображения в телескопе обусловлен дифракцией света на входной апертуре. Как показал Рэлей, в предельном по качеству изображении есть яркое ядро диаметром $2,44\lambda/D$ (λ — длина волны, D — диаметр апертуры), окруженное все более слабыми и широкими световыми кольцами. Его диаметр по уровню, соответствующему половине центральной интенсивности ($D_{0,5}$), равен $D_{0,5} = 1,03\lambda/D$ радиан. В качестве теоретического предела разрешения двух звезд произвольно принято условие, когда первое темное кольцо от одной звезды попадает под центр изображения другой ($1,22\lambda/D$ радиан). Тогда телескоп со свободной апертурой 5,1 м (200 дюймов) на волне 633 нм должен давать изображения диаметром $D_{0,5} = 0,03''$ и обладать таким же пределом разрешения. Как мы вскоре увидим, атмосфера ограничивает разрешение на гораздо более низком уровне. Турбулентное размытие изображения расширяет эффективное поле зрения, тем самым взамен меньшего количества высококачественной информации получается большее количество низкосортной.

Обнаружение слабых объектов в первую очередь связано с отношением сигнала к шуму. Поскольку я хочу выделить фундаментальные ограничения, рассмотрим случай слабого изображения, наблюдаемого на ярком небе¹. Сигнал S есть полное число фотонов, зарегистрированных от точечного источника с потоком f_λ на телескопе с известной апертурой D при квантовом выходе Q_λ и эффективной ширине спектральной полосы W_λ за полное время наблюдения t ,

$$S = f_\lambda \cdot (\pi D^2/4) Q_\lambda W_\lambda t.$$

В предельном случае шум N будет равен квадратному корню из сигнала от участка неба, равного по площади ($\pi\varphi^2/4$) изображению звезды. Если поверхностная яркость неба описывается величиной s_λ , то

$$N = \sqrt{s_\lambda \cdot \pi\varphi^2/4 \cdot \pi D^2/4 \cdot Q_\lambda \cdot W_\lambda \cdot t}.$$

Тогда поток от звезды на пределе обнаружения составит

$$f_\lambda = \frac{1}{\sqrt{Q_\lambda W_\lambda}} \left(\frac{S}{N} \right) \frac{s^{1/2} \varphi}{Dt^{1/2}}. \quad (1)$$

Формула показывает, что при неизменной эффективности системы и яркости неба порог обнаружения улучшается линейно с уменьшением изображения и тоже только линейно с ростом апертуры.

¹ Ночное небо может считаться ярким при наблюдении слабых звезд.—
Прим. перев.

Качество астрономического изображения (или астроклимат) является исключительно важным ограничением в наземных телескопах. По существу оно низводит гигантов до уровня карликов. Это сильный уравнивающий фактор. В поисках мест с лучшим астроклиматом экспедициям пришлось объездить все уголки земного шара, а астрономам подняться на вершины гор. Астроклимат присутствует всегда, и в данном месте он, по-видимому, становится наилучшим непосредственно перед вводом в строй там первого крупного телескопа.

Нетрудно понять, чем определяется качество изображения. Когда мы смотрим на точечный источник (звезду) сквозь земную атмосферу, луч зрения проходит через множество неоднородностей температуры, давления и, что важнее всего, показателя преломления¹. Значит, луч света звезды по пути к наблюдателю испытывает хаотические блуждания, и когда он попадет на апертуру телескопа, то направление прихода окажется чуть не таким, как на самом деле. Когда апертура значительно меньше неоднородностей, размер изображения звезды будет определяться размером и качеством телескопа, но оно будет дрожать из-за перемещения неоднородностей. Человеческий глаз является примером такого малого телескопа, вот почему звезды мерцают: иногда изображение полностью сдвигается со зрачка глаза². Зависимость качества изображения от зенитного расстояния также легко устанавливается невооруженным глазом: мерцание быстро усиливается при приближении к горизонту, поскольку возрастает число неоднородностей на луче зрения.

В крупных телескопах искажения приводят к другим, более серьезным последствиям (рис. 2). Когда диаметр апертуры заметно больше метра, что соответствует характерному размеру неоднородностей, звездное изображение оказывается составленным из множества маленьких изображений, или спеклов (зерен). Каждое такое зерно представляет собой резкое изображение, качество которого зависит от телескопа³. Трудность заключается в том, что таких зерен много, они слабые и движутся, так что при экспонировании усредняются и образуют неподвижное изображение, называемое турбулентным диском.

В одном определенном месте размер турбулентного диска изменяется со временем, а средние и наилучшие условия наблюдений в разных местах различаются. Согласно уравнению

¹ В оптическом диапазоне между неоднородностями температуры и показателя преломления есть однозначная связь.— *Прим. перев.*

² Необходимо различать явления дрожания и мерцания изображений. Разумеется, на зрачке никакого изображения нет.— *Прим. перев.*

³ Размер зерен равен в среднем размеру дифракционного диска телескопа и не зависит от его аберраций.— *Прим. перев.*

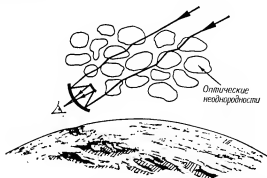


Рис. 2. Искажения астрономических изображений связаны с прохождением света через области земной атмосферы с флуктуациями температуры. Каждая температурная ячейка обладает своим показателем преломления.

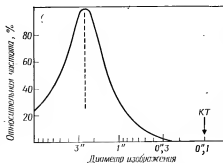


Рис. 3. Размер турбулентного диска на 200-дюймовом Паломарском телескопе. В любом другом месте он сильно меняется. Данное распределение, вероятно, типично для большинства мест с хорошим астроклиматом. По менее полным данным, лучшие в среднем условия наблюдений существуют в немногих местах, таких, как Серро-Тололо в Чили.

(1), при обнаружении слабых объектов размер турбулентного диска ϕ столь же важен, как и диаметр апертуры D , поэтому неудивительно, что обсерватории строят в местах с наилучшим астроклиматом, невзирая на их удаленность. На рис. 3 приведена относительная частота появления изображений разных размеров в телескопе Хэйла на горе Паломар в Калифорнии. Это не самое лучшее по астроклимату место, но довольно типичное. Мы видим, что условия наблюдений бывают весьма разнообразными, чаще всего качество изображения составляет примерно $2''$. Иногда оно может быть гораздо лучше, зато иногда изображения такие плохие, что наблюдения прекращают. Если в наше выражение для $D_{0.5}$ подставить длину волны 633 нм и размер турбулентного диска $2''$, то получится, что в 5-м телескопе Хэйла типичные изображения не лучше, чем в телескопе с апертурой 7 см. Они просто ярче! Это фун-

даментальное ограничение действует для всех крупных телескопов и приводит к тому, что с увеличением апертуры выигрыш пропорционален ее размеру только в первой степени, а стоимость постройки телескопа — в гораздо более высокой¹.

Несомненно, строительство более крупных наземных телескопов имеет смысл, и основные наши усилия направлены на то, чтобы стоимость не так резко возрастала с увеличением апертуры. Однако наблюдения в космосе выигрывают по качеству, ибо такая система, как КТ, даст изображения в десять раз лучше, чем можно получить на Земле. Когда будет разработана новая технология создания наземных телескопов, ее можно будет применить и к телескопам космическим.

Новый метод спекл-интерферометрии обещает дать очень высокое угловое разрешение с поверхности Земли за счет регистрации изображений с высоким временным разрешением и последующей обработки данных, когда зерна складываются вместе и образуют одно составное изображение. Этот метод может быть сильно усовершенствован, однако есть практические ограничения, не позволяющие использовать его для слабых объектов.

Помимо качества изображения астроклимат зависит от географических факторов. В местах, удаленных от экватора, в году бывают обычно сухой и дождливый сезоны. Иногда они совпадают с сезонной сменой продолжительности ночей далеко не оптимально. В южной Калифорнии, например, сухой сезон бывает летом, когда ночи самые короткие.

В любом месте наблюдения зависят от фаз Луны. В полнолуние яркость неба возрастает примерно в 25 раз и соответственно наблюдательные программы часто строятся с учетом этого ограничения. Как правило, период светлого неба вблизи полнолуния отводится для спектроскопии с высоким разрешением, тут яркость неба не важна.

Преломление света даже в совершенно спокойной атмосфере приводит к двум нежелательным для наблюдений эффектам: хроматической и дифференциальной рефракции. Рефракция увеличивается на коротких волнах. Разность рефракций в синих и желтых лучах равна 0,5" при зенитном расстоянии 30° и быстро возрастает при его увеличении. Это искажение добавляется к турбулентному размытию. Дифференциальная рефракция — эффект второго порядка, связанный с различием рефракции в разных частях поля зрения. В поле размером 1/3° изображения будут искажены на 0,5" при переходе от зенита к зенитному расстоянию 50°. Значит, длительность подобных наблюдений ограничена примерно четырьмя часами.

¹ Принято считать, что стоимость телескопа растет как D^2 .⁷ — Прим. перев.

3. История проекта

Многим полным энтузиазма молодым людям, работающим по программе КТ, кажется удивительным, что его идея насчитывает более 50 лет: один из пионеров ракетостроения Г. Оберт указал на преимущества подобного инструмента еще в 1923 г. Его подход был умозрительным, потому что тогда практически не было необходимой технологии. Само собой, пророком должен был стать специалист по ракетам, ведь главным препятствием являлось отсутствие системы транспортировки. Однако лишь после второй мировой войны, когда в 1945 г. в распоряжении США оказались большой запас трофейных ракет «ФАУ-2» и группа обладающих опытом в области ракетостроения инженеров, американские ученые всерьез стали думать о будущих астрономических наблюдениях из космоса и заниматься этим.

В то время над КТ начал работать Лайман Спитцер (рис. 4) из Принстонского университета. Он опубликовал доклад (тогда

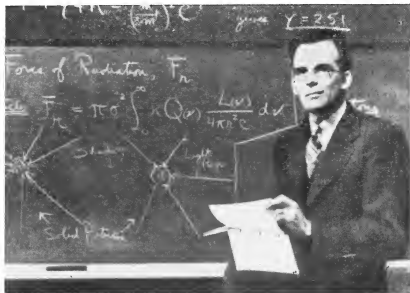


Рис. 4. Профессор Принстонского университета Лайман Спитцер, снимок сделан в 1946 г. В те годы он заложил основы для исследований, увенчавшихся созданием КТ. В течение 35 лет он был среди ученых наиболее горячим приверженцем космической астрономии.

секретный), где не только рассматривались преимущества космоса для наблюдений, но даже были перечислены их научные задачи [13]. После не совсем удачных запусков «ФАУ-2» большинство астрономов утратили интерес к космической астрономии и среди них господствовало мнение, что нужно заниматься другими, более важными вещами. Ведь тогда только что начал работать 5-м телескоп на горе Паломар, а обнаружение излучения межзвездного водорода на волне 21 см положило начало современной радиоастрономии. Все следующее десятилетие главным и серьезным защитником космической астрономии оставался Спитцер. По мере появления все более крупных ракет возрастали потенциальные возможности космической астрономии, и к моменту образования Национального управления по аэронавтике и космическим исследованиям (НАСА) по крайней мере наиболее проникательные люди, в том числе Артур Д. Коуд из Висконсинского университета и Лайман Спитцер, уже понимали, что в научную программу этой новоявленной организации может входить астрономия. Как мы увидим дальше, оба они возглавили работу над основными астрономическими спутниками, без которых был бы невозможен КТ.

При поддержке Национальной академии наук НАСА создало представительную группу для выработки программы космических исследований. Ученые собрались в 1962 г. в Айове и среди прочих рекомендаций назвали КТ как естественную конечную цель длительной программы исследований космической астрономии [7]. В 1965 г. на аналогичном совещании в Вудз-Холе (шт. Массачусетс) эта рекомендация была повторена [8]. В соответствии с ней Академия наук США организовала специальный комитет во главе с Лайманом Спитцером, чтобы выявить научные задачи и обосновать полезность 3-м космического телескопа. Доклад комитета, изданный в 1969 г. в виде брошюры [9, 14], определил четкие направления работы, которыми в конечном счете руководствовалось НАСА.

Позже идея КТ получила поддержку комитета Академии наук США под руководством Дж. Л. Гринштейна из Калифорнийского технологического института [10], изучавшего нужды астрономии того десятилетия. Тогда сущность и стоимость КТ были не вполне известны и его считали более далекой перспективой, как впоследствии и оказалось.

Как только по рекомендации этих совещательных органов началось изучение КТ, потребовалось привлечь конкретных специалистов. Для этого было образовано несколько групп, соответствующих различным стадиям работы над проектом.

Осенью 1971 г. НАСА организовало комитет по разработке КТ под руководством Нэнси Д. Роман, возглавлявшей тогда отдел астрономии и теории относительности. Она пригласила еще

шестерых астрономов, чтобы вместе с ними обеспечить научную часть исследований по осуществимости проекта, проходивших на двух базах НАСА — в Центре космических полетов им. Годдарда под Вашингтоном (округ Колумбия) и в Центре космических полетов им. Маршалла около Хантсвилла (шт. Алабама). Группа регулярно собиралась в течение года, более обстоятельно чем академический Комитет, определяла конкретные задачи для КТ и оценивала проектные решения, предлагаемые центрами и их подрядчиками.

На смену этому комитету пришла Рабочая группа управления полетом КТ под руководством только что назначенного ведущего разработчика проекта (автора). Она располагалась в Центре космических полетов им. Маршалла, незадолго до того ставшего ведущим. В состав группы вошли несколько сотрудников НАСА, назначенных потому, что они занимали ключевые позиции в проекте КТ, но большинство ее членов были выбраны по открытому конкурсу. НАСА объявило о приглашении участвовать в конкурсе зимой 1973 г., а в июне были проведены выборы и определена научная структура. Она была многоуровневой, причем наивысшее положение занимала Рабочая группа из сотрудников НАСА, занятых проектированием (в центрах космических полетов) и программой полета (в руководстве НАСА), затем следовали руководители групп разработки приборов и внештатные сотрудники, призванные заботиться об общих характеристиках обсерватории. Группа была большой и включала 40 специалистов из 26 различных организаций.

Образование этих двух комитетов характерно для способа разработки научных программ в НАСА. Идей всегда бывает гораздо больше, чем позволяют время и средства, но некоторые из них исследуются на осуществимость (на языке НАСА это называется фаза А) с целью предварительно выяснить возможность принятия данного проекта. Обычно изучается много подходов и выбирается наилучший. Лишь малая часть исследований фазы А доходит до фазы В, когда вырабатываются предварительные проекты. Нередко в фазе В исследуются различные варианты, но конечным продуктом является базовый проект, который НАСА может использовать в фазе С/D при заключении контракта на проектирование и разработку. В фазе В делается также гораздо более точная оценка необходимого времени проектирования и стоимости. И снова только немногие из переданных на изучение в фазе В проектов достигают фазы С/D. Низкий «процент выживания» обусловлен недостатком средств. Исследования в фазах А и В обычно финансируются из общих фондов, то есть средств, всегда имеющихся в НАСА для изучения проектов.

Крупные проекты, вступающие в фазу С/D, должны быть поименно включены в бюджет НАСА и подвергаются многим про-

веркам за пределами этой организации. Проект должен быть принят правительством, действующим через административно-бюджетное управление, иначе он не будет включен в бюджет НАСА, который президент представляет в конгресс. В конгрессе законопроекты об утверждении и финансировании, куда включен проект, должны отдельно пройти палату представителей и сенат. В общем неудивительно, что так мало проектов переживают скачок от изучения к воплощению.

Когда КТ был готов к проектированию и разработке, руководство НАСА издало в марте 1977 г. циркулярное письмо, извещающее о приеме предложений по участию в работе над инструментом. Начатый тем самым процесс привел к отбору 68 специалистов из 38 организаций для участия в нескольких исследовательских группах. Была назначена руководящая научная группа, называемая теперь Рабочей группой КТ. Она состоит из нескольких важных сотрудников НАСА, руководителей групп разработки приборов (их иногда называют ведущими разработчиками), специалистов по междисциплинарным проблемам, специалистов по телескопу (то есть тех, кто больше всех занимается входящим в состав обсерватории телескопом), руководителя астрометрической группы, руководителя группы обработки данных. Руководители приборной и астрометрической групп имеют в своем распоряжении по 6—10 специалистов, а в группу обработки данных кроме ее руководителя входят представители всех других групп.

3.1. Выработка технологии

Космический телескоп опирается на двадцатилетнее развитие техники астрономических наблюдений из космоса. При образовании НАСА понимали, что среди прочих наук будет развиваться и космическая астрономия. Речь шла не о том, можно ли это сделать, а о том, как именно. Одним из крайних вариантов могла бы быть постройка серии все более сложных ракетных приборов перед тем, как решиться на работу со спутников; ведь именно такой подход с большим успехом использовали исследователи верхней атмосферы и Солнца. Но у астрономов были значительно более высокие требования. Небесные источники гораздо слабее, и для получения полезной информации нужны более длительные наблюдения. Требуется также наводить и стабилизировать телескоп с высокой точностью. Эти соображения заставили НАСА сделать первый важный шаг — сконструировать серию спутников под названием орбитальных астрономических обсерваторий (ОАО). Запланировано было сделать три спутника, которые должны обеспечивать энергопитание, наведение и связь для установленной на них научной

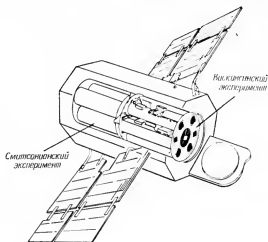


Рис. 5. Общий вид спутника ОАО—А2. Он является типичным среди четырех аппаратов этой серии. Стандартный спутник обеспечивал энергоснабжение, наведение и телеметрию для установленных на нем приборов. Последний спутник серии ОАО («Коперник») прекратил работу в начале 1981 г., прожив 8,5 лет.

аппаратуры. Следовательно, на первом этапе пришлось решать вопросы управления, передачи информации и гидирования. Неудивительно, что первый запуск состоялся позже, чем думали. Первый спутник вышел из строя, не успев дать никаких результатов. По программе ОАО его заменил другой функционально идентичный аппарат, на котором было поставлено оборудование для экспериментов, подготовленных в Висконсинском университете, и простая камера для обзора, сделанная в Смитсоновской астрофизической обсерватории. Третий запуск ОАО был неудачным, а четвертый вывел на орбиту 80-см телескоп со спектрометром, созданный в Пристонском университете. ОАО-3 успешно работала более 7 лет. На этих двух спутниках (рис. 5) были получены важные научные результаты [10, 16]; не меньшее значение имела и отработка базовой технологии. Из критических элементов отсутствовала только высокоточная оптическая система, которая ни в одном из экспериментов на ОАО не понадобилась. Соответствующую технологию нужно было отработать в других экспериментах.

Самый крупный астрономический телескоп был запущен по программе «Стратоскоп II». Она предусматривала подъем в стратосферу на баллоне 90-см телескопа для получения спектров и изображений с высоким разрешением. После нескольких не совсем удачных полетов на «Стратоскопе II» были зарегистри-

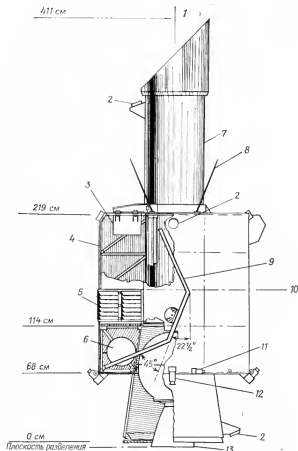


Рис. 6. Международный спутник для ультрафиолетовых исследований (IUE) — обсерватория на геостационарной орбите, оснащенная телескопом и эшелльным спектрометром. Цифры слева — расстояния от начала отсчета (плоскости разделения). 1 — ось X; 2 — антенна на полосу частот S; 3 — датчики ориентации; 4 — теплоизоляция; 5 — терморегулирующее покрытие; 7 — телескоп; 8 — УКВ-антенны; 9 — солнечные батареи; 10 — ось Z; 11 — движки ориентации с тягой 40 г; 12 — движки с тягой 2 кг; 13 — двигатель коррекции апогея.

стрированы изображения звезд, планет и ядер галактик с разрешением около $0,2''$ по уровню 0,5 — гораздо лучшим, чем было достигнуто на Земле для слабых объектов, и близким к дифракционному пределу для телескопа такого размера [1]. В некоторых отношениях «Стратоскоп II» был сложнее КТ, потому что разработчикам пришлось мириться с небольшими остатками

атмосферы в трубе телескопа. Поскольку экспозиции были только короткими, в целом задача была легче, но «Стратоскоп II» явился важным шагом на пути к КТ.

Естественным продолжением спектрометрического эксперимента на ОАО-3 является международный спутник для ультрафиолетовых исследований IUE (рис. 6). Это аппарат специальной конструкции с 45-см телескопом, питающим спектрометр. Качество работы значительно улучшено за счет применения панорамного телевизионного приемника, позволяющего одновременно работать на многих длинах волн в отличие от последовательной регистрации с фотоумножителями на ОАО-3. Весьма важное различие проектов связано с выводением IUE на геостационарную орбиту, что существенно улучшает условия работы благодаря непрерывной связи со спутником из Центра космических полетов им. Годдарда или Европейского космического агентства, совместного участвующих в этом эксперименте. Спутники ОАО, наоборот, выводились на низкую околоземную орбиту, и связь с ними поддерживалась только в коротких интервалах при прохождении над наземными станциями.

Одновременно с изготовлением этих реальных спутников изучались возможности осуществления крупных долговечных телескопов, строящих изображение. Круг идей был необычайно широк. Рассматривались орбиты от низких (как у ОАО) до геостационарных (как у IUE) и поверхности Луны. Идея телескопа на лунной поверхности казалась привлекательной, но была отвергнута из-за высокой стоимости доставки, высокой освещенности и больших перепадов температур. Телескоп на геостационарной орбите был бы идеален с точки зрения разработчиков, но он стоил бы дорого (нужна ракета класса «Сатурн»), а посещение его для доработки оказалось бы не по карману. Степень участия человека также предполагалась весьма различной. С одной стороны, утверждалось, что присутствие человека (даже в случае редких посещений для обслуживания) заставляет учитывать меры безопасности, резко удорожающие проект, и гораздо дешевле сделать невозвращаемый спутник с очень надежными компонентами. Рассматривался и прямо противоположный вариант, когда команда астронавтов управляет работой обсерватории на орбите и живет в ней или рядом. Как мы увидим, этот спор разрешился после выяснения параметров имеющейся транспортной системы.

К началу фазы А (анализ осуществимости) в 1971 г. в проекте КТ остановились на телескопе с 3-м апертурой на низкой околоземной орбите. Тогда НАСА еще не начало разработку КК «Спейс шаттл», поэтому пришлось рассчитывать на запуск ракетой «Титан» и участие человека оставалось под большим сомнением. Изучалось по несколько альтернативных

вариантов конструкции многих узлов системы, в том числе зеркала (толстое и жесткое или тонкое и гибкое), несущих элементов телескопа (металл с термоконтролем или композиционный материал с малым коэффициентом теплового расширения) и научных приборов (один многоцелевой прибор или несколько разных). Главными результатами исследований, выполненных в фазе А, явились принятые решения, компромиссы и выявленные «узкие места». Проведенные исследования позволили также выработать лучшую программу действий.

В исследованиях фазы В разрабатывались предварительные проекты, но это делалось путем анализа многих возможностей. Теперь КТ приобрел гораздо более резкие очертания, и работы внутри НАСА стали сильно дополняться работами подрядчиков. В фазе А почти все делалось сотрудниками НАСА в Центрах космических полетов им. Маршалла и им. Годдарда. Сотрудники НАСА играли важную роль и в фазе В, но к ним добавились оптические и аэрокосмические фирмы. Это не только привлекло к работе новых людей со свежими идеями и опытом в данной области, но и сильно расширило масштабы деятельности. Предварительные проекты телескопа разрабатывались параллельно фирмами «Перкин—Элмер» (Денвери, шт. Коннектикут) и «Айтек» (Лексингтон, шт. Массачусетс). Параллельное проектирование систем спутника велось фирмами «Боинг» (Сизтл, шт. Вашингтон), «Мартин—Марьетта» (Денвер, шт. Колорадо) и «Локхид» (Саннивейл, шт. Калифорния). Со всеми этими организациями были заключены контракты, но результаты намного превосходили вложенные средства. В подобных фирмах обычно практикуется использование определенной части прибыли от какой-либо программы для финансирования работ, обеспечивающих конкурентоспособность при получении будущих заказов. Поскольку контракт на разработку КТ был явно желателен, каждая корпорация вложила в свои исследования в несколько раз больше средств, чем было отпущено правительством.

В течение этого периода проект КТ стал четко определен. Установилось деликатное равновесие, когда новые возникающие идеи становились известны всем, но так, что не нарушалось право собственности на результаты, полученные фирмами за счет собственных ресурсов. В самом начале фазы В НАСА было разрешено начать разработку транспортного космического корабля (ТКК) «Спейс шаттл», и нам предстояло на основе ТКК спроектировать обсерваторию. Разумеется, это нас ограничивало, но зато отпало много отвлекающих силы вариантов.

До сих пор в НАСА все время шла речь о 3-м апертуре, рекомендованной комитетом Национальной академии наук в 1969 г. Выбранный размер был не произвольным, но и не

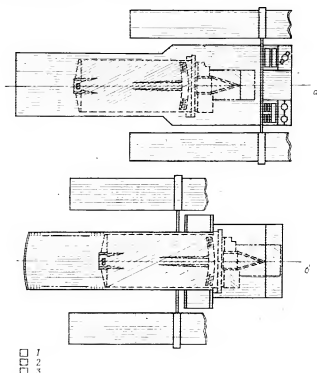


Рис. 7. *а* — вариант КТ с большим моментом инерции, обусловленным 3-метровой апертурой. Вынесение тяжелых служебных систем требует наличия мощных движков ориентации; *б* — конфигурация КТ с низким моментом инерции, достигнутым благодаря размещению тяжелых служебных систем в виде торонда вокруг главного зеркала. Тем самым апертура КТ ограничивается до 2,4 м. (1 — модуль служебных систем; 2 — телескоп; 3 — научные приборы).

обязательно оптимальным. На «Спейс шаттл» можно разместить обсерваторию с телескопом диаметром до 3,2 м. В проекте с максимальной апертурой требуется такая конфигурация спутника, когда оптический телескоп располагается на одном конце цилиндра, а служебные системы — на другом, позади научных приборов (рис. 7, *а*). Этот спутник имеет большой момент инерции, и нужна разработка мощной и потому дорогой системы стабилизации. Если уменьшить апертуру до 2,4 м, то вокруг главного зеркала (центра масс) останется место для размещения систем спутника, момент инерции получится гораздо меньше и можно будет применить хорошо зарекомендовавшие себя способы наведения (рис. 7, *б*). Конечно, тот же вариант применим

и для меньших, более дешевых инструментов. Как будет указано ниже, в корпорации «Айтек» разработали экспериментальное зеркало диаметром 1,8 м, аналогичное зеркалу КТ. Эти соображения заставили НАСА изучить три возможных размера апертуры КТ: 3 м — основной размер, с которого началась программа; 2,4 м — размер, допускающий иную, более дешевую конфигурацию спутника; 1,8 м — размер с более простой и заведомо известной технологией изготовления главного зеркала.

В результате проработки трех вариантов в качестве новой основы программы КТ был выбран размер 2,4 м. Было принято во внимание ожидаемое упрощение проекта за счет уменьшения апертуры с 3 до 2,4 м с соответствующим снижением стоимости и неуверенности в разработке. Проекты с апертурами 2,4 и 1,8 м сравнительно мало различаются по стоимости, главным образом из-за того, что основная доля средств затрачивается на разработку, а не на увеличение размера.

В выборе размера апертуры решающую роль сыграла Рабочая группа управления полетом КТ. Конечно, с точки зрения астрономов, чем больше телескоп, тем лучше, но если увеличение апертуры сопряжено с непомерными расходами, то лучше уж иметь 2,4-м телескоп, чем совсем никакого. Это было трудное решение, но в конце концов Рабочая группа одобрила предложенный проект 2,4-м телескопа, и новый размер утвердили официально.

Ученых интересовало прежде всего качество работы КТ, а не инженерный проект. Это не помешало членам Рабочей группы управления полетом КТ включиться в работу в фазе В, и многие из их предложений по конструкции телескопа были приняты. Главным достижением стала выработка перечисленных ниже минимальных требований к качеству работы КТ. Требования сформулированы с ориентацией на конкретные научные задачи и с полным учетом современных технических возможностей, они являются основополагающими в программе КТ.

1. КТ должен быть многоцелевой долговременной обсерваторией, то есть допускать работу с различными научными приборами и их замену с течением времени.

2. К качеству изображения в оптической и ультрафиолетовой (близкая вакуумная) областях предъявляются следующие требования: разрешение по критерию Рэлея $0,10''$, диаметр по уровню $0,5-0,1''$, 60 % всей энергии звездного изображения содержится в кружке диаметром $0,15''$.

3. Вся система КТ должна эффективно работать на коротких волнах до 1150 \AA , чтобы изучать линию $\text{Ly}\alpha$ 1216 \AA , и в то же время допускать эффективные наблюдения в длинноволновом ИК-диапазоне, уже недоступном с Земли.

4. Требуется устанавливать не менее четырех научных приборов.

5. КТ должен измерять гораздо более слабые объекты, чем наблюдаются с Земли. В настоящее время это означает, что нужно идти до 27-й звездной величины при отношении сигнала к шуму 10 и времени экспозиции 4 ч.

6. Нужно измерять протяженные источники с поверхностной яркостью $23,0^m$ с квадратной секунды при отношении сигнала к шуму 10 за 15 ч.

7. КТ должен допускать работу с входными диафрагмами приборов, сравнимыми с размером изображения.

В фазе В деятельность не ограничивалась идеями и написанием бумаг. Была проведена и серия испытаний реальных узлов. К наиболее критическим частям проекта относились следующие три из них:

1. Фирма «Айтек» заказала у фирмы «Корнинг» диск сотовой конструкции и сделала из него зеркало с качеством поверхности $\lambda/64$. Эта работа показала, что высокоточные облегченные зеркала могут быть изготовлены без серьезных трудностей.

2. В компании «Мартин—Мариетта» испытали предложенные для управления наведением КТ силовые гироскопы на сейсмически изолированном стенде, подобном КТ по инерционным свойствам, и добились среднеквадратичной стабильности наведения $0,007''$.

3. Полутораметровая труба из графито-эпоксидного композита, моделирующая один из предложенных в фазе В вариантов конструкции, удерживающей главное и вторичное зеркала в точно съюстированном состоянии, была построена фирмой «Дженерал дайнэмикс». Тем самым была доказана возможность изготовления из этого нового материала точной конструкции, подходящей по коэффициенту теплового расширения и механическим свойствам для КТ. Если бы позволили средства, можно было бы провести много других испытаний, но эти три разрешили главные сомнения.

3.2. Борьба в Капитолии

НАСА представляет собой федеральное управление, его деятельность утверждается и финансируется декретами конгресса США с согласия президента. В промежутке между словом и делом бывает немало перипетий. Как нас учат в школе, законами являются законопроекты, одобренные обеими палатами конгресса (палатой представителей и сенатом) и подписанные президентом. Если президент отказывается подписать законопроект, его вето может быть отменено большинством в две трети при голосовании в обеих палатах конгресса. Планы и бюджеты

утверждаются на каждый финансовый год (ф. г.), длящийся с октября по сентябрь, то есть 1982 ф. г. начинается 1 октября 1981 г. и заканчивается 30 сентября 1982 г.

НАСА готовит свой бюджет задолго до начала финансового года. Поскольку руководство НАСА назначается президентом, оно должно подчиняться исполнительным органам правительства. Таким образом, бюджет НАСА сначала представляется в административно-бюджетное управление в сентябре предшествующего года. На подготовку такого проекта бюджета уходит обычно около четырех месяцев интенсивной работы. Следовательно, бюджет на 1982 ф. г. начинают готовить в мае 1980 г. и представляют в административно-бюджетное управление в сентябре 1980 г. Там решают, согласуется ли этот проект бюджета НАСА с политикой администрации и общим правительственным бюджетом, который они готовят. Как правило, происходит несколько последовательных приближений, когда НАСА пытается обосновать и отстоять свои предложения, а административно-бюджетное управление стремится урезать расходы. Результатом деятельности административно-бюджетного управления является проект федерального бюджета, который президент представляет в конгресс в январе.

Общий бюджет очень сложен, и в конгрессе создана система комиссий, позволяющая анализировать каждый раздел с помощью специалистов. Для утверждения и финансирования имеются параллельные структуры с большой центральной комиссией и множеством мелких подкомиссий. Обычно законопроект должен пройти через подкомиссию, прежде чем попасть в полную комиссию, которая в свою очередь должна утвердить его перед тем, как он пойдет в палату представителей или сенат. Это означает, что мнение подкомиссий палаты представителей и сената важнее всего при утверждении и финансировании, а их руководители весьма влиятельны. Короче говоря, бюджет НАСА зависит от решения четырех подкомиссий, в каждой из которых около 12 членов. Преимущество этой системы заключается в том, что любой член подкомиссии располагает достаточным временем и хорошо осведомлен об агентствах, относительно которых принимается решение. Недостаток ее в том, что один красноречивый и отрицательно настроенный человек способен нарушить работу хорошо построенной системы. Можно сказать, что утверждающие подкомиссии «упрямствуют» по отношению к руководимым организациям, а финансирующие подкомиссии исследуют их бюджеты со скептическим взглядом и острыми ножницами в руках.

В течение фазы В проект КТ привлек необычное внимание со стороны конгресса. Из-за внутренней осторожности и отсут-

ствия поддержки космической программы конгрессом НАСА предпочло включить КТ отдельным пунктом в проект бюджета на 1975 ф. г., несмотря на то что такие исследования обычно проводятся под анонимным прикрытием «будущих программ». Конгресс привык рассматривать отдельные проекты только тогда, когда они готовы к осуществлению. Он очень внимательно относится к каждой новой программе, отдельно включаемой в предлагаемый бюджет, потому что останавливать начатую программу — значит, выбрасывать деньги на ветер. Когда в подкомиссии увидели новый пункт под названием «Космический телескоп», который может обойтись в полмиллиарда долларов, к нему отнеслись очень критически. Подкомиссия палаты представителей его и в самом деле исключила! Если бы на этом все кончилось, то программа была бы мертва, еще не успев начаться. Эта подкомиссия отвечала также за бюджет Национального научного фонда, и ее члены прекрасно знали о средствах, отпущенных фондом на развитие астрономии. Недавно было финансировано строительство системы VLA, и председатель подкомиссии считал, что с ассигнованиями на новые крупные инструменты нужно пока повременить. К счастью, в финансовом законопроекте сената значились ассигнования на изучение КТ, поэтому когда представители подкомиссий обеих палат собрались для согласования законопроектов, то к обсуждению КТ вернулись. Его финансирование восстановили на более низком, чем просило НАСА, уровне и включили в окончательный бюджет, тем самым все-таки сохранив проект.

Эти события определили ту обстановку, в которой осуществлялась программа КТ. Сложилось впечатление, что КТ можно удешевить, если просто усилить давление и выделить меньше средств. Из числа членов палаты представителей и сената, с чьим мнением не посчитались, образовалась первая оппозиция. Ученые вспомнили тогда, что они могут повлиять на решения конгресса. Стихийная и подчас путаная серия писем, телефонных разговоров и визитов ученых удивила и произвела впечатление на членов подкомиссий и их сотрудников. Это не заменило детальной работы, выполненной в НАСА, но заставило понять, что ученые хотят строительства космической обсерватории. Такая активность ученых не только оказалась полезной в данной ситуации, но и познакомила их с людьми и организационной структурой, подготовив при необходимости подобную реакцию в будущем [15].

Стоимость КТ была еще более неопределенной, чем сама программа, и это неудивительно, ведь нужно хорошо представить себе, что именно делать, прежде чем определить, сколько это будет стоить. По мере выработки инженерных решений

уточнялась и стоимость. Казалось, она превосходит предел допустимого для конгресса, и выявленные затраты попытались снизить до приемлемого уровня. На этом этапе изучалась стоимость трех вариантов разных размеров и апертуру сократили до 2,4 м. Принятое решение уменьшило стоимость и техническую неопределенность проекта. Другие резервы экономии были не столь ясны, ибо бюджет был изменен и покрывал только начальные затраты на разработку и выведение на орбиту. Стоимость эксплуатации и обновления была отнесена к менее подготовленной части бюджета, которую предстояло запросить потом. Высказывались обвинения в умышленном усложнении дела и нерациональности; все они были преувеличены, но не лишены доли истинны.

Разработка КТ в фазе В велась с таким расчетом, чтобы начать изготовление телескопа в 1977 ф. г., однако этого не произошло. Сначала намечали начать изготовление еще раньше, но фазу В пришлось растянуть, учитывая недостаток средств — не более того, что одобрено конгрессом. При подготовке бюджета на 1977 ф. г. НАСА не включило туда новый пункт о строительстве КТ, что вызвало большую озабоченность работавших над проектом людей, ученых, поддерживавших его уже в течение нескольких лет без гарантии вознаграждения, и подрядчиков, вложивших в проект в фазе В в 3—5 раз больше своих средств, чем положено по договорам. Когда при анализе бюджета на 1977 ф. г. выяснилось, что проекту КТ предстоит всего лишь завершить затянувшуюся фазу В, поднялся шум и крик. Сотрудники НАСА были бессильны, потому что бюджет был принят их руководством, но ученых и подрядчиков это не связывало, и они начали склонять конгресс к тому, чтобы включить в законопроект НАСА разрешение продолжить разработку и строительство КТ. Включение и финансирование нового плана работ, отсутствующего в бюджете, представленном организацией, было необычным шагом, хотя подобные прецеденты имели место, и снова начались телефонные звонки, письма, визиты. Это почти помогло, но в конце концов сопротивление нескольких членов палаты представителей и сенаторов (тех, кто препятствовал финансированию КТ все предшествующие годы) и руководства НАСА решило дело, и никаких официальных попыток назначить новый срок не последовало. Был достигнут один компромисс, позволяющий начать процесс отбора ученых и подрядчиков в 1977 ф. г. Это обеспечивало возможность быстро приступить к работе в 1978 ф. г.

Вся работа, проделанная в течение фазы В, отразилась в бюджете, принятом на 1978 ф. г. НАСА поддержало КТ, административно-бюджетное управление пропустило его, а кон-

гресс одобрил. Это казалось даже неестественным после стольких лет борьбы не за жизнь, а за смерть. Оппоненты все же сказали свое слово, и было достигнуто соглашение, что общая стоимость проекта не превысит 575 млн. долларов в ценах 1982 г. Мир был подписан, но последние выстрелы еще не прогремели. Сенатор вправе потребовать проверки федеральных программ управлением общего контроля, и специальную проверку начали немедленно. Теперь состоялось уже две проверки, причем во второй разбирались подробности общего перерасхода средств в программе КТ. Благодаря тому что в решении будущих проблем НАСА есть еще много неопределенностей, телескоп является очень долговечным, а инфляция может продолжаться в течение многих лет; в конечном счете эксплуатация КТ обойдется намного дороже его разработки! Многим из причастных к делу специалистов доклад Управления общего контроля напомнил скорее передовую статью в торговой газете, нежели хладнокровную оценку состояния дел, но противники КТ в конгрессе этого и хотели.

Европейское космическое агентство (ЕСА) начало участвовать в программе КТ во время фазы В. Началось с того, что ЕСА включило наблюдателя в Группу управления полетом КТ, а НАСА отправило делегацию в несколько европейских городов с целью рассказать ученым и администраторам о программе КТ. Наблюдатель ЕСА участвовал уже в бюджетном кризисе 1975 ф. г. Откровенный противник больших ассигнований на науку спросил, пытались ли переложить часть расходов на плечи ЕСА. Ответ НАСА его не удовлетворил, и от НАСА потребовали тщательно рассмотреть возможность международного сотрудничества. Это было сделано, хотя заняло несколько лет. Для заключения международных соглашений всегда нужно много времени, и данное не было исключением, потому что обеим организациям пришлось тщательно изучить реальные для себя варианты. В итоге решено было, что ЕСА обеспечит три важных позиции: один из научных приборов, а точнее камеру слабых объектов; солнечные батареи для энергоснабжения спутника; постоянную помощь научной организации, эксплуатирующей КТ, своими кадрами. В награду за это ЕСА выделяется 15 % наблюдательного времени КТ в соответствии с долей общих ассигнований на проект. Участие ЕСА стало очень нужной частью программы, поскольку по уровню инженерных и научных работ европейцы, несомненно, не уступают НАСА. Помимо шагов по непосредственному участию в той части программы, которую ведет НАСА, ЕСА принимает также меры к тому, чтобы обеспечить ученым всех входящих в ЕСА стран легкий доступ к полученным на КТ данным.

4. Ограничения проекта

Космический телескоп проектировался в расчете на достижение определенных характеристик, но с учетом множества инженерных и финансовых ограничений. В этом разделе я рассмотрю факторы, выявленные при изучении в фазах А и В и на ранних этапах проектирования. Именно они определили крайние пределы возможных инженерных решений. Стоимость всегда была важным дополнительным элементом, который, однако, труднее всего оценить количественно, и здесь мы не будем на этом подробно останавливаться. Недостаток точных данных о стоимости в значительной степени является результатом недостаточного времени, опыта и ресурсов у сотрудников правительственных организаций, работающих над проектом, но отчасти вызван тем, что в данных о стоимости пришлось положиться на потенциальных подрядчиков. В период конкурирующих параллельных исследований трудно ожидать полных (и честных) оценок стоимости даже от самых опытных и альтруистических экспертов фирм, ориентированных все-таки на получение прибыли.

Главные ограничения проекта с начала и до конца связаны с транспортной системой, определяющей возможности запуска и доработки спутника. Сюда же относится система связи для управления обсерваторией и приема данных. Разумеется, есть и более очевидные ограничения, вызванные особенностями оптической схемы, системы наведения и общей конфигурации аппарата.

По решению НАСА в 80-х годах единственной в США транспортной системой для низких околоземных орбит должен быть ТКК «Спейс шаттл». Это решение основано прежде всего на политико-экономических соображениях. «Спейс шаттл» — отличная система для многих задач, но не для всех она идеальна. Тем не менее решили, что она будет единственной, потому что было бы невыгодно выводить на ней только часть грузов НАСА, ведь в период, последовавший за программой «Аполлон», экономия стала определяющим фактором. Следовательно, КТ и все другие крупные современные спутники должны были проектироваться, исходя из характеристик «Спейс шаттл». К счастью, эти характеристики сравнительно благоприятны.

Многие особенности транспортной системы «Спейс шаттл» хорошо описаны в литературе. Это летательный аппарат с реактивным двигателем, способный выйти на низкую околоземную орбиту, совершить баллистический возврат в атмосферу и сделать посадку в аэропорту с длинной полосой, оборудованной специальными электронными средствами навигации. Все аппараты серии практически идентичны и могут летать неоднократно.

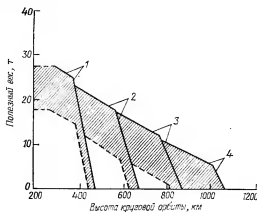


Рис. 8. Грузоподъемность ТКС «Спейс шаттл». Можно выйти на более высокие орбиты, увеличивая дискретными порциями запас топлива в системе маневрирования на орбите за счет уменьшения полезной нагрузки. 1 — собственные возможности системы маневрирования на орбите; 2 — добавлен один дополнительный топливный блок; 3 — добавлено два блока; 4 — добавлено три блока.

На проект КТ влияют три главные характеристики ТКС «Спейс шаттл»: высота орбиты, объем грузового отсека, расположение и вес груза при взлете и посадке. Все эти параметры взаимосвязаны.

«Спейс шаттл» предназначен для вывода грузов на низкую орбиту. Твердотопливные ракеты и главные топливные резервуары обеспечивают орбиту, достаточную для многих (но не для всех) задач, причем время жизни аппаратов на ней вплоть до торможения и возврата в плотные слои сравнительно невелико. Величина реактивного импульса задана, поэтому точная высота орбиты будет зависеть от ее наклона. В задней части грузового отсека могут быть установлены дополнительные топливные баки. Соответствующие возможности запуска показаны на рис. 8.

КТ лучше всего вывести на геостационарную орбиту радиусом около $42 \cdot 10^3$ км; к сожалению, для столь массивного аппарата это невозможно. Если геостационарная орбита недоступна, то лучшая из оставшихся расположена гораздо ниже. Ее высота определяется противоборством двух факторов: продолжительностью свободного полета и защитой от радиации. На низкую орбиту легко доставить аппарат, туда совершается много полетов (что выгодно для обслуживания КТ), но баллистическое торможение в верхней атмосфере непрерывно снижает высоту. Орбита должна быть настолько высокой, чтобы торможение

ние не привело к разогреву и выходу из строя КТ прежде, чем можно будет в очередной раз посетить его и сделать коррекцию орбиты. Однако выше — не всегда лучше, потому что по мере приближения к окружающим Землю поясам захваченных частиц радиационная обстановка становится неблагоприятной.

Требуемая высота орбиты наложила ограничения на проект КТ. Оставшийся свободный объем грузового отсека представляет собой цилиндр диаметром 4,6 м и длиной 14 м, куда можно поместить груз весом до 17 т. Как показано на рис. 8, вес и объем КТ уменьшаются за счет дополнительных резервов топлива, необходимых для выведения спутника на наилучшую орбиту высотой примерно 500 км.

Максимальное ускорение «Спейс шаттл» за счет работы реактивных двигателей примерно втрое больше ускорения силы тяжести. Это наиболее простое ограничение при запуске и посадке, другие не столь очевидны. При запуске перегрузки направлены продольно, вдоль естественной оси прочности телескопа. Во время посадки перегрузка действует на телескоп вертикально, вдоль его слабой оси, и доходит до 4,2g. Более того, прочность конструкции должна гарантировать, что при аварийной посадке ни одна деталь не оторвется и не повредит экипажу. Ко всему этому нужно прибавить высокий уровень вибраций при запуске, особенно когда главные реактивные двигатели и твердотопливные ракеты-ускорители только начинают работать. Все эти факторы должны быть учтены и требуют гораздо более жесткой конструкции, чем нужно в действительности для устройства и работы самого КТ.

4.1. Оптическая система

Оптическая система КТ должна удовлетворять различным критериям по длине, диаметру, светосиле, возможности изготовления, полю зрения. Здесь больше ограничений, чем в обычном крупном наземном телескопе. Как всегда бывает при проектировании сложной системы, конечным результатом является наилучший компромисс.

Имеющийся объем грузового отсека «Спейс шаттл» задает общую длину и диаметр спутника. В разделе об истории проекта объяснялось, почему для уменьшения момента инерции желательно сосредоточить как можно больше массы вблизи центра тяжести. Поскольку самой тяжелой деталью является зеркало, а место за ним нужно оставить для научных приборов, обслуживающие системы пришлось расположить вокруг него в виде тороида. При такой компоновке апертура была ограничена до 2,4 м. Требования компактности заставили избрать оптическую схему с изломанным ходом лучей (схему Кассегрена), однако

не все 14 м длины могут быть заняты оптикой. Нужно, чтобы затеняющая заслонка выступала вперед за вторичное зеркало и чтобы между задней поверхностью главного зеркала и фокусом имелось свободное пространство. Пространство за фокальной плоскостью следует оставить для научных приборов.

Окончательная светосила зависела прежде всего от проектов научных приборов. В большинстве из них с пучком прореживаются внутренние преобразования, например коллимация и дисперсия в спектрографах или увеличение в камерах. При слишком малой светосиле приборы заняли бы чересчур много места, при высокой светосиле очень трудно разделить ограниченное поле зрения. Оно разбито на части, и места для перебрасывающих линз или коллиматоров достаточных размеров не хватает.

Еще одно соображение по поводу длины непосредственно вытекает из анализа светосилы главного зеркала и системы в целом. Мейнел [6] ясно показал, что нужно строго сбалансировать светосилы. Если вторичное зеркало увеличивает мало, то на первый взгляд требования к стабильности ослабляются, зато большее расстояние между главным и вторичным зеркалами усиливает требования на допуски механической конструкции. Следовательно, проектировщики стремятся увеличить светосилу главного зеркала. Ее предельное значение зависит от методов производства и контроля, особенно последнего. Сейчас могут быть сделаны очень светосильные зеркала, но их крайне трудно испытывать. Такое прецизионное зеркало, как у КТ, нужно исследовать с интерферометром сдвига с точностью $\lambda/50$, а при слишком высокой светосиле систему контроля становится трудно разработать и осуществить.

Размер поля зрения имеет первостепенное значение. Очевидно, чем больше поле, тем лучше, до тех пор пока не ухудшается качество изображения. Среди двухзеркальных систем наибольшим полем обладает система Ричи—Кретьена, строящая свободные от комы изображения в широком поле зрения, но зато на его краях имеется астигматизм, фокальная плоскость искривлена, а фигуры главного и вторичного зеркал немного сложнее. Астигматические звездные изображения на периферии поля зрения приемлемы для точного гидирования, поэтому выбор оптической системы Ричи—Кретьена был совершенно очевидным.

Наконец, рассмотрим выбор спектрального диапазона. Требовалась чисто зеркальная система, эффективно работающая в области спектра от ультрафиолетовой до инфракрасной. К сожалению, оптимизация качества оптики на обоих краях диапазона обходится слишком дорого. Поскольку рабочие температуры КТ гораздо выше криогенных, уровень instrumen-

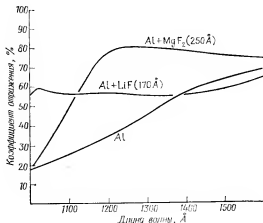


Рис. 9. Отражающая способность алюминия в ультрафиолетовой области сохраняется и даже возрастает при покрытии его прозрачными веществами. К сожалению, LiF очень гигроскопичен и дорог по сравнению с MgF_2 .

тального фона велик. Лучший способ снизить его влияние — вычитать фон с помощью качающегося вторичного зеркала. Это идеальное решение, но оно существенно усложняет крепление вторичного зеркала, которое должно быть сверхстабильным, чтобы получить отличные изображения. Другая граница спектрального диапазона определяется коэффициентом отражения зеркал. Здесь идеально было бы иметь высокую отражательную способность вплоть до лаймановского предела 912 Å — на этой длине волны межзвездная среда начинает очень сильно поглощать. По своим отражающим свойствам чистая алюминиевая поверхность близка к тому, что нужно (рис. 9), но она непрактична, поскольку сразу после попадания на воздух происходит окисление, а нанесение отражающих покрытий в космосе — исключительно трудная задача. Имеются два перспективных покрытия: MgF_2 и LiF. Из них MgF_2 — вещество практичное, его легко наносить, но оно начинает поглощать сразу за линией $\text{L}\alpha$ (1216 Å), отрезая много интересных межзвездных линий поглощения, обнаруженных со спутника ОАО-3 («Коперник») [16]. Другое вещество, LiF, расширяет диапазон, но очень гигроскопично, и после нанесения покрытия оптику нужно специально оберегать. Возможность покрытия зеркал КТ LiF серьезно рассматривалась, но из-за длительности процедур сборки и испытаний дополнительные затраты в этом случае оказались бы слишком велики.

4.2. Наведение обсерватории и стабилизация ориентации

В КТ изображения будут гораздо резче, чем в любом наземном телескопе, поэтому необходима более высокая точность его наведения и стабилизации, чем та, которую обычно требуют астрономы и проектировщики. На Земле требования к наведению и стабилизации удовлетворяются, как правило, монтажкой и часовым приводом. Совсем не так обстоит дело на летящем спутнике, который невозможно зафиксировать и приходится непрерывно определять ориентацию.

Изображения размером порядка $0,1''$, построенные КТ, часто будут попадать в сравнимую по размеру диафрагму, чтобы получить наилучший контраст. Так будет, например, в спектрографе низкого разрешения, предназначенном для изучения звездобразных галактических ядер. Для того чтобы получить надежную информацию со столь малыми диафрагмами, ошибка наведения КТ должна быть гораздо меньше $0,1''$. Согласно проекту, требуется точность наведения $\pm 0,01''$. С этой целью приходится предпринять ряд шагов.

Двумя основными источниками сведений об ориентации являются гироскопы и звезды. Поскольку гироскопы имеют дрейф, их приходится периодически проверять по звездам, поэтому на самом деле нужны обе системы. Возможно несколько степеней привязки к звездам. Грубая привязка выполняется с широкоугольными телескопами, осматривающими почти все небо. Они называются неподвижными звездными датчиками и дают координаты звезд с блеском примерно до 5-й звездной величины с точностью около $1'$. Информация следующего уровня точности об ориентации относительно звезд должна поступать от самого телескопа. Она может быть очень точной, и данные с ошибкой $0,01''$ будут поступать от устройства, которое служит также для стабилизации спутника.

Система сопровождения (точного гидирования) является наиболее критичной частью КТ. Телескоп должен следить за объектом с точностью $0,007''$ и временем реакции намного меньше 1 с. Добиться такой точности можно только с помощью изображений, построенных самим КТ. При этом не стоит заходить в рабочую область поля зрения, рискуя помешать наблюдениям, нужно брать изображения на периферии. В системе Ричи—Кретьена краевые изображения страдают астигматизмом, и в устройстве сопровождения это следует учитывать.

Выдвигались два варианта системы точного гидирования. Первый — растр из прямоугольных призм с расстоянием между гранями около $1''$. Он настраивается так, что у одной совокупности призм грани находятся в тангенциальной фокальной пло-

скости, а у другой — в сагитальной. Таким образом, каждая призма разрезает своей гранью резкое изображение. При помощи наклонной пластинки или иных устройств изображение гидрочной звезды выставляется на ближайшее пересечение граней призм и по интенсивностям четырех отдельных пучков судят о смещении изображения с вершин пирамид. Вторая система гидрирования — интерферометрическая. Оптико-механическое устройство перебрасывает изображение потенциальной гидрочной звезды на входную диафрагму. Пучок коллимируется и расщепляется на ортогональные компоненты, каждая из которых освещает затем призму Кёстера (рис. 10). Когда падающий пучок строго перпендикулярен основанию призмы, интерференционные картины перед фотоумножителями одинаковы, и сигнал сбалансирован. При угловом смещении гидрочной звезды меняются интерференционные картины и интенсивности соответствующих пучков, причем очень чувствительно. Обе эти сложные системы работоспособны, и каждая имеет свои преимущества.

Система точного гидрирования должна следить не только за неподвижными объектами, но и за движущимися. На самом деле даже при наблюдении неподвижных звезд требуется непрерывно смещать телескоп из-за аберрации света. Нам хорошо знакома аберрация света звезд, вызванная тангенциальной составляющей скорости наблюдателя относительно направления на звезду. Когда КТ обращается вокруг Земли, звезды смещаются вперед и назад относительно своих истинных положений. Если наблюдаемая область близка к полюсу орбиты КТ, то это не страшно, потому что звезда и объект сдвигаются оди-

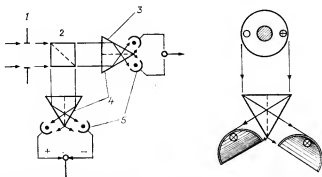


Рис. 10. Схема интерферометра с призмой Кёстера для получения сигналов точного гидрирования. При угловом смещении звезды распределение интенсивности перед фотоумножителями быстро меняется. 1 — выходной зрачок телескопа; 2 — светоделительный кубик; 3 — узел, повернутый на 90° ; 4 — призмы Кёстера; 5 — ФЭУ.

наково. Около плоскости орбиты КТ абберация так сильно зависит от направления, что гидировочная звезда смещается относительно объекта. Значит, нужно непрерывно вводить поправки за взаимный сдвиг. К счастью, их величина может быть точно рассчитана, но система должна реагировать на коррекции достаточно чутко. Эти трудности усугубляются при наблюдении тел Солнечной системы, которые смещаются на небе из-за собственного орбитального движения, орбитального движения Земли и параллакса¹. Было поставлено условие, чтобы КТ мог следить за кометой Галлея, когда она в 1986 г. будет иметь наибольшую угловую скорость (0,21" в секунду).

Все эти сигналы рассогласования должны изменять направление оси телескопа. Для этого есть два способа: силовые гироскопы (если маховик ускорять в одном направлении, то КТ повернется в противоположном) и малые реактивные двигатели. Из-за чувствительности КТ к возможным выбросам двигателей пригодны только маховики или их функциональные аналоги.

4.3. Управление обсерваторией

Сам по себе КТ является не очень «умным» аппаратом. Он знает способ самозащиты в случае серьезной неисправности и знает, когда перейти в состояние консервации перед прибытием «Шаттла». Если не считать этих нескольких защитных функций, все остальные команды нужно подавать из центра управления. Подобным же образом вся научная и техническая информация должна передаваться с обсерватории на наземные станции, и «Шаттл» не возвращает на Землю никаких данных. В такой ситуации требуется очень надежная система связи.

Обычно спутники на низких околоземных орбитах управлялись с помощью связи со станциями наземной системы слежения и сбора данных при прохождении в зоне видимости. НАСА решило ее ликвидировать после ввода в строй спутниковой системы слежения и ретрансляции перед запуском КТ. В состав спутниковой системы входят два универсальных спутника-ретранслятора, расположенные над Атлантическим и Тихим океанами на геостационарных орбитах, и наземные станции связи с ними. Каждый спутник одновременно обеспечивает 20 каналов связи для передачи таких данных, как с КТ объемом 50 кбит/с и много других каналов. Такая емкость представляется достаточной, однако число потенциальных пользователей мощными каналами будет гораздо больше числа кана-

¹ Имеется в виду параллакс, обусловленный орбитальным движением КТ.— *Прим перев.*

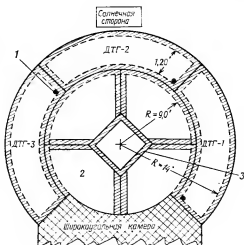
лов, поэтому нужно обеспечить работу КТ без непрерывной передачи большого количества информации. Это можно сделать только с помощью бортовых магнитофонов для запоминания научных данных в процессе их сбора и бортовой системы запоминания команд управления спутником. Запоминание очень важно еще и потому, что КТ будет находиться в зоне видимости спутников-ретрансляторов около 85 % времени. Антенны КТ должны обеспечивать высокий темп передачи и приема данных. Нужна либо очень большая фиксированная всенаправленная антенна, либо подвижная остронаправленная антенна.

4.4. Научные приборы

Принципы построения научных приборов для КТ вызвали наиболее серьезные разногласия. Так и не удалось выявить простого и общеприемлемого подхода, поэтому пришлось пойти на серьезные компромиссы.

Первые крупные споры возникли относительно природы научных приборов. Некоторые считали, что нужно установить в фокусе один большой прибор. В нем спектрографы с разной дисперсией имели бы общие коллиматоры. Так можно было бы осуществить несколько перебрасывающих систем, строящих изображения разного масштаба на панорамных светоприемниках, и в качестве полезной побочной функции выполнялось бы фотометрирование источников. Альтернативная точка зрения заключалась в установке нескольких отдельных независимых научных приборов. В варианте с одним «сверхприбором» достаточно эффективно используется ограниченное поле хороших изображений, а управлять прибором может одна организация. Каждый из отдельных научных приборов может быть более эффективен для конкретных приложений, но при компоновке, возможно, трудно будет обеспечить доступ к фокусу. Это ограничение могло быть устранено применением поворотного стола, но идея была забракована как слишком дорогостоящая из-за очень высоких требований к точности. Вариант «сверхприбора» отпал вследствие его малой эффективности и малой гибкости, не допускающей модификаций по мере появления лучших светоприемников и изменения направления исследований. В конце концов решено было разделить фокальную плоскость на восемь частей (рис. 11). Центральный участок отклоняется плоским зеркалом перпендикулярно оптической оси (место для радиальных научных приборов). Его окружают четыре сектора, где пучок направлен по оси и питает отдельные аксиальные научные приборы. Периферийные астигматические изображения перехватываются отклоняющими зеркалами и попадают на три датчика системы точного гидирования. Для всех приборов четко

Рис. 11. План фокальной плоскости (на самом деле искривленной). Она поделена между научными приборами и датчиками точного гидрирования (ДТГ). Штриховкой показаны экранируемые области. 1 — перебрасывающее зеркало датчика волнового фронта; 2 — одно из четырех полей для научных приборов, установленных на оптической оси; 3 — диагональное зеркало широкоугольной камеры (100×100 мм).



выделены участки фокальной плоскости и пространственный объем. В таком варианте можно по отдельности разрабатывать, эксплуатировать и заменять научные приборы, что немало важно для долговременной обсерватории.

4.5. Контроль рассеянного света

Для максимального использования телескопа на низкой околоземной орбите необходимо иметь возможность наблюдать даже тогда, когда инструмент освещен Землей, Луной и Солнцем. Этого можно добиться, но устранению рассеянного света следует уделить гораздо больше внимания, чем в наземном телескопе. В идеале рассеянный свет подавлен настолько, что его влияние мало по сравнению с естественной освещенностью неба.

Естественный фон излучения обусловлен прежде всего зодиакальным светом, то есть солнечным светом, рассеянным на межпланетных частицах. Поскольку частицы концентрируются к плоскости эклиптики, там расположена полоса наибольшей яркости, плавно возрастающей по мере приближения к Солнцу. Область наименьшей яркости находится слегка в стороне от полюса эклиптики, там освещенность неба соответствует излучению звезды 23-й величины с каждой квадратной секунды дуги. В проекте КТ задано условие, чтобы рассеянный свет никогда не превосходил этого уровня.

Рассеянный свет Солнца и Луны довольно легко рассчитать и устранить, потому что это компактные источники, испускаю-

щие почти параллельные пучки. Со светом Земли дело обстоит сложнее, потому что он яркий и приходит с различных направлений. Все эти излучения нужно ослабить до уровня самой темной зоны зодиакального света. Когда телескоп направлен очень близко к яркому источнику, это невозможно сделать, поэтому мы установили, что уровень рассеянного света, указанный выше, должен обеспечиваться на угловом расстоянии 50° от Солнца, 15° от Луны и 70° от яркого края Земли.

Имеются три способа устранения рассеянного света: экранирование, отклонение и поглощение. Экранирование есть перекрытие луча зрения непрозрачной поверхностью. С этой целью телескоп окружен снаружи трубой, а на главном и вторичном зеркалах установлены бленды. Отклонение — это контроль направления света. Приходится принять во внимание, что весь свет исключить никогда не удастся, и проектировать телескоп так, чтобы отражения были четко определены и не достигали важных частей телескопа. Ключевым параметром является здесь степень зеркального отражения. Как правило, поверхности с наиболее низкой общей отражающей способностью отражают свет диффузно, и значительная его доля расходится во все стороны. Уже разработаны поверхности с малым полным коэффициентом отражения, которые почти все излучения отражают зеркально. Поглощение достигается применением поверхностей с очень малой отражающей способностью, практически сразу «съедающих» фотоны. Теперь достигнуты коэффициенты отражения менее 1 %.

4.6. Техническое обслуживание и доработка КТ

Именно благодаря возможности обслуживания и доработки КТ является настоящей обсерваторией, а не просто космическим аппаратом. Разница между обслуживанием и доработкой заключается в том, что первое означает модификации и починку на орбите, а второе — операции, выполняемые на Земле после возвращения.

Главное влияние на организацию обслуживания и доработки оказывает доступность «Шаттла». Если бы «Шаттл» мог совершать полеты когда угодно и бесплатно, приборы КТ проектировались бы из дешевых и ненадежных компонентов, потому что их легко было бы чинить. Если же рейсы «Шаттла» производятся от случая к случаю и за них нужно платить, то следует сбалансировать стоимость разработки и посещения. Согласно первоначальному плану использования «Шаттла», предполагалось, что спрос на него будет велик и, невзирая на стоимость, частые рейсы окажутся невозможными. Когда НАСА не смогло обеспечить для «Шаттла» достаточного грузооборота, его до-

ступность возросла. К сожалению, официально этот факт был признан слишком поздно, и мы не успели подготовить проект в расчете на максимальное использование «Шаттла».

Перспективное планирование распределения участков фотоплоскости и светоприемников в сильной степени зависело от наличия «Шаттла». Этот фактор оказался решающим, когда дело дошло до споров о том, стоит ли применять на КТ фотографию. Ее важное преимущество — большое количество элементов изображения, позволяющее регистрировать практически все поле зрения с дифракционным разрешением. Малый квантовый выход фотозульсии можно повысить с помощью ЭОПов. Очевидные трудности в работе связаны с задержкой между экспозицией и проявлением снимка на Земле. Серьезной проблемой оказалось вуалирование пленки быстрыми частицами, падающими на спутник. Даже пленка умеренной чувствительности покроеется вуалью за 2 месяца. Если бы были доступны дешевые ежемесячные рейсы «Шаттла», то можно было бы думать о применении фотоматериалов, если же нет, то пришлось бы прибегнуть к светоприемникам с дистанционной передачей сигнала, что в любом случае в общем неплохо. Решено было, что для ежемесячных посещений КТ «Шаттл» окажется слишком занят, и, более того, это обойдется слишком дорого. Таким образом, от фотографии отказались.

Согласно проекту, КТ будет выводиться на орбиту и возвращаться с помощью «Шаттла». Следовательно, его нужно закрывать во избежание повреждений выбросами из малых маневровых реактивных двигателей «Шаттла». Кроме того, все выступающие части должны убираться при запуске, складываться или отбрасываться перед возвращением.

Организация обслуживания проводится на двух уровнях. Во-первых, находится баланс между стоимостью и надежностью компонентов. Установить дорогие и качественные узлы может быть выгоднее, чем планировать ремонт. Во-вторых, приходится решать вопрос обслуживания или замены узлов на орбите. Участие астронавтов требует принятия мер безопасности, и в своих скафандрах они способны работать только с крупными деталями.

Доработку мы обязаны предусмотреть (номинально — раз в 5 лет), но можем надеяться, что она на самом деле не понадобится. Вероятно, некоторые операции, например чистку и повторное алюминирование главного зеркала, нельзя будет выполнять на орбите. Следовательно, периодическое возвращение на Землю необходимо. С другой стороны, следует уменьшить загрязнение и разъюстировку оптической системы во время возвращения на Землю, поэтому доработка должна продолжаться не более года.

5. Планируемая конструкция спутника

В предыдущем разделе перечислены факторы, ограничивающие проектирование КТ. Теперь рассмотрим настоящий проект. Некоторые системы уже изготовлены, проектирование остальных завершается. Как всякий спутник КТ проектируется целиком, поэтому ничего из описанного здесь проекта не должно быть сильно изменено к моменту запуска.

Чтобы разобраться в системе КТ, нужно понять, каким образом правительство США разрабатывает новые системы и создает основные компоненты. Из года в год идет язвительная полемика о правильном сочетании внутренних (государственных) работ с работами подрядчиков. Сторонники государственной централизации утверждают, что это выгодно, потому что не нужно выплачивать прибыль, а сторонники контрактов считают, что прибыль с избытком компенсируется более высокой отдачей специалистов, и чем государственные организации меньше, тем они лучше. Компромисс достигается тогда, когда имеется небольшой коллектив исследователей, состоящих на службе у государства, который в процессе разработки по мере необходимости дополняется специалистами подрядчиков. Группа инженеров, ученых и администраторов направляет деятельность подрядчиков и руководит ими. Подрядчиков примерно в 10 раз больше по численности, чем государственных служащих. Нужно умудриться так дирижировать их деятельностью, чтобы разные части работы делались в срок.

У государственного учреждения есть своя структура. Его возглавляет администрация, отвечающая за бюджет и политику. Затем следует отдел, представляющий проект перед администрацией и внешними организациями. Базы НАСА имеют конкретные обязанности в рамках проекта, и для этого организуется отдел по руководству проектом. В данном случае проект КТ распадается на четыре большие части: узел оптического телескопа, модуль служебных систем (собственно сам спутник), научные приборы и управление. Центр космических полетов им. Маршалла отвечает за разработку КТ в целом, в частности за узел оптического телескопа и модуль служебных систем. На этапе разработки ему помогает Центр космических полетов им. Годдарда, на который возлагается ответственность за научные приборы и управление.

В программе КТ участвуют буквально сотни крупных подрядчиков, но доминируют два. Это фирма «Локхид мисайлс энд спейс корпорейшн» в Саннивейле (шт. Калифорния), которой поручено сделать модуль служебных систем, и корпорация «Перкин—Элмер» из Денверн (шт. Коннектикут), изготавливающая узел оптического телескопа. Имеет смысл остановиться на

том, как были выбраны эти подрядчики, поскольку процесс выбора отражает способ руководства проектом и типичен для всех крупных заказов.

Сначала правительство издает «Объявление о сборе предложений», где указано, что именно нужно построить, определяются его характеристики и согласование с другими системами. В этом объявлении не сообщается способа решения задачи, а просто говорится, каковы функции изделия и как оно взаимодействует с другими устройствами или управляющими системами. Конкурирующие предложения оцениваются хорошо действующей системой, называемой Бюро оценки поставщиков. Ему помогают комитеты инженеров и администраторов, обеспечивающие фактическую интерпретацию и оценку. Бюро оценки поставщиков направляет затем свои рекомендации ответственному за выбор лицу, обычно директору центра или управляющему в зависимости от величины и масштаба сделки, который и выбирает подрядчика. Точнее, выбирается потенциальный подрядчик, с которым начинают переговоры о заключении данного контракта. Именно контракт, явившийся результатом переговоров, составляет основу всей деятельности. Любые изменения и дополнения обязательно влекут повторные переговоры о стоимости, но даже неизменные контракты подлежат переоценке. Большинство контрактов предусматривает оплату стоимости работ и вознаграждения. Основываясь на предполагаемой потребности в ресурсах, подрядчики начинают работу. Если понадобится меньше людей или материалов, то даются определенные кредиты. Гораздо чаще оказывается, что работа обходится дороже, чем предусмотрено, и приходится оплачивать счета. Однако в четко определенной задаче подобные перерасходы ограничиваются двумя принципиальными обстоятельствами. Во-первых, государственные служащие, осуществляющие оценку и руководство, обязаны обладать достаточным опытом и проницательностью, чтобы выявить настоящие потребности и отличить их от умышленного занижения стоимости в борьбе за заказ. Второе ограничение накладывается системой премий: некоторая часть (обычно от 5 до 10 %) полагающейся по контракту суммы выплачивается подрядчику в зависимости от качества исполнения, определяемого государством. Добавка в 10 % может удвоить общую прибыль и тем самым является мощным стимулом сократить требования и придерживаться первоначального плана. Вся эта деятельность связана с написанием бумаг, заседаниями, докладами и визитами. Это удивительный мир телефонных звонков, где специалисты говорят сокращениями вместо обычных человеческих слов, где приходится мириться

с поражениями и иногда сталкиваться с примерами блестящих технических и административных способностей. Система действует, и НАСА хорошо справляется с такой работой.

5.1. Оптические детали и их крепление

Для КТ избрана оптическая система Ричи—Кретьена с параметрами, приведенными в табл. 1. Проект представляет собой наилучший компромисс между нашими специфическими ограничениями и потребностями. Главное зеркало имеет сотовую конструкцию с тонкими пластинками спереди и сзади. Чтобы придать поверхности заготовки нужную форму, ее «просадили», то есть положили на шаблон и нагрели. Заготовка из стекла со сверхнизким коэффициентом теплового расширения изготовлена фирмой «Корнинг» и представляет собой последнее слово современной технологии (рис. 12).

Этот узел весьма важен, поэтому на самом деле мы заказали два зеркала. Главный подрядчик — фирма «Перкин—Элмер», второй — фирма «Кодак» в Рочестере (шт. Нью-Йорк). Методы полировки совершенно различные. Фирма «Истмен кодак» применяет станок Дрэпера с обыкновенными большими

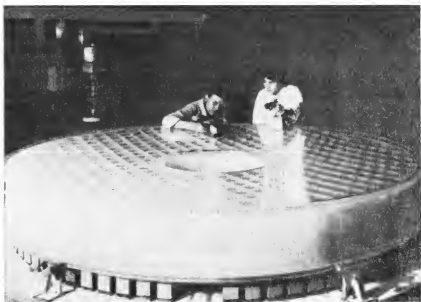


Рис. 12. Заготовка главного зеркала КТ сделана из тонких листов стекла со сверхнизким коэффициентом теплового расширения, сплавленных вместе и образующих легкую конструкцию.

Параметры оптической системы КТ

Таблица 1

Диаметр апертуры	2,4 м
Светосила	1:24
Центральное экранирование	14 %
Расстояние между зеркалами	4,9 м
Расстояние от передней поверхности главного зеркала до фокуса	1,5 м
Покрывание зеркал	Al + MgF ₂

полировальниками. Фирма «Перкин—Элмер» использует станок с очень маленькими полировальниками, управляемый ЭВМ. В обоих случаях осуществляется контроль с интерферометром. В момент подготовки этой статьи качество поверхности обоих зеркал было лучше $\lambda/50$ и работа быстро шла к завершению.

На фирму «Перкин—Элмер» уже доставлена труба в виде фермы из графито-эпоксидного композита. Тесты на тепловую стабильность показали, что требуемое нами постоянство размеров с точностью 1 мкм будет обеспечено (рис. 13).

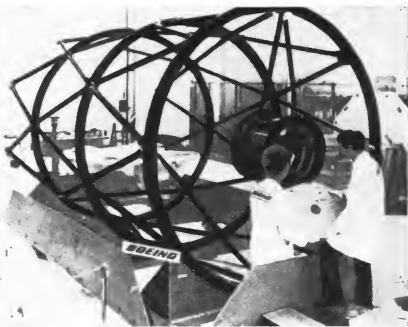


Рис. 13. Графито-эпоксидная ферма, удерживающая главное и вторичное зеркала в съюстированном состоянии, непосредственно перед отправкой заказчику.

Во время запуска КТ оптические детали немного сдвинутся. По причине жестких допусков на юстировку предусмотрена регулировка положения вторичного зеркала по шести степеням свободы. Юстировка определяется тремя датчиками контроля оптики — интерферометрами сдвига, работающими по яркой звезде. Их сигналы передаются на Землю, где вырабатываются и посылаются на КТ команды регулировок. С помощью этой подсистемы чаще всего будет проверяться фокусировка; ее, вероятно, достаточно будет контролировать раз в несколько дней.

Применяются все возможные меры к тому, чтобы в процессе производства главное зеркало КТ было свободно от влияния силы тяжести. Однако если так не получится, то на всякий случай сзади главного зеркала установлено 24 привода, чтобы на орбите деформировать поверхность нужным образом. Качество фигуры зеркала также будет определяться подсистемой контроля оптики, анализироваться и корректироваться с Земли. Мы надеемся, что эта система не понадобится, но она все-таки установлена для подстраховки.

5.2. Система точного гидирования

Система точного гидирования служит для выработки сигналов гидирования по астигматическим изображениям на периферии поля зрения, обеспечивающих стабилизацию спутника со среднеквадратичной погрешностью $0,007''$. Три одинаковых датчика изготавливаются фирмой «Перкин—Элмер». Их число объясняется тем, что нужно всегда иметь два работающих гида (один дает сигналы направления оптической оси x , y , а другой — информацию о повороте относительно нее) и обеспечить достаточную надежность работы. Поле зрения системы точного гидирования определяется, исходя из чувствительности датчиков и числа подходящих звезд. Принято, что 85 % полей, случайно расположенных в области полюса Галактики, должны содержать гидировочные звезды.

Гидировочные звезды выбираются заранее. Как правило, их абсолютные положения будут известны с точностью $1-2''$, а положения относительно объекта наблюдения — с точностью $0,5-1''$. Зачастую координаты будут определяться по существующим фотографическим обзорам неба. Их точности достаточно для работы широкоугольных приборов, таких, как широкоугольная камера и камера слабых объектов. При работе на приборах с малой входной диафрагмой, таких, как спектрограф слабых объектов и спектрограф высокого разрешения, придется иногда непосредственно перед наблюдениями определять точные координаты с помощью широкоугольной камеры.

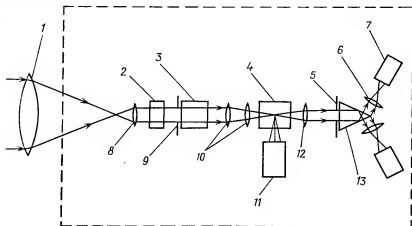


Рис. 14. Схема датчика точного гидрирования. Его действие описано в тексте. 1 — оптическая система КТ; 2 — преломляющие элементы; 3 — селекторы звезд; 4 — разделение поля зрения между устройствами грубого и точного гидрирования; 5 — зрачок, уменьшенный в 240 раз; 6 — линза Фабри; 7 — фотоумножитель; 8 — коллиматор; 9 — зрачок, уменьшенный в 45 раз; 10 — линзы Петцваля; 11 — диссектор для грубого гидрирования; 12 — линза-склейка; 13 — призма Кёстера.

Проект датчика фирмы «Перкин—Элмер» показан на рис. 14. Поле зрения интерферометра перемещается в фокальной плоскости с помощью поворотных перебрасывающих призм. Потом параллельный пучок падает на призму Кёстера, образующую картину интерференционных полос на двух фотоумножителях. Полосы не сканируются, приемники регистрируют полную интенсивность пучков, меняющуюся при смещении звезд. Чувствительность системы такова, что необходимая точность будет обеспечена для звезд ярче $13,5^m$. Это наиболее сложная и трудная в исполнении система во всей обсерватории.

5.3. Система наведения и управления

Система наведения и управления не дает КТ «заблудиться» и осуществляет грубое наведение. Движение КТ непрерывно управляется силовыми гироскопами. Управляющие сигналы поступают от нескольких источников. Первый опорный сигнал приходит от шести гироскопов — датчиков скорости, названных так потому, что их положения известны не очень точно, но скорость изменения ориентации может быть хорошо измерена и позволяет рассчитать, куда именно «смотрит» телескоп. Положения

гироскопов периодически уточняются с помощью информации от неподвижных звездных датчиков и системы точного гидирования. Перед тем как перейти на новый объект наблюдения, по сигналу системы точного гидирования от предыдущего объекта определяется положение гироскопов. Затем телескоп переводят в новую ориентацию со скоростью до 15° в минуту. Неподвижный звездный датчик, представляющий собой простой телескоп с системой фотоумножителей, определяет по нескольким (трем) ярким звездам, насколько близок телескоп к расчетному положению. Суммарная точность наведения по гироскопам и неподвижным звездным датчикам составит, как правило, около $1'$, что намного меньше рабочего поля системы точного гидирования.

Затем датчик системы точного гидирования, поле зрения которого равно $2''$, начинает искать гидировочную звезду, двигаясь по спирали (каждому датчику нужно найти по одной звезде). Яркость каждой обнаруженной звезды измеряется, и если она отличается от заданной не более чем на $0,3^m$, то поиск прекращается, а второй датчик продолжает искать до тех пор, пока не поймает звезду в нужном интервале яркости. Окончательно правильность отождествления проверяется по взаимному расположению двух звезд-кандидатов, что является гораздо более жестким критерием, чем блеск. Если положение не сходится с намеченным, то поиск продолжается, пока не будут исчерпаны все комбинации в поле размером $3'$. Затем пытаются найти запасную звезду (если она есть) или разрешают телескопу перейти на следующий объект наблюдения.

Для работы научных приборов с малым полем нужна дополнительная информация, если положение объекта относительно гидировочных звезд не определено с точностью около $0,01''$. Как правило, столь точные координаты не будут известны без специальных наземных астрометрических наблюдений или предыдущих наблюдений объекта на КТ. В таком случае есть три возможности: по сигналу научного прибора можно рассчитать на Земле, куда направить телескоп; то же самое можно сделать без связи с Землей; наконец, можно привлечь к поиску объекта широкоугольную камеру или камеру слабых объектов. В последнем случае гидировочные звезды и датчики те же, что и для основного прибора (например, спектрографа слабых объектов), но изображение наблюдаемого объекта падает на камеру (например, широкоугольную). Производится короткое экспонирование, и снимок передается на Землю. Затем наблюдатель выбирает точное направление КТ и посылает последовательность команд на спутник, где автоматически выполняется окончательная настройка. Очевидно, указанный способ работы требует наличия хорошей связи с астрономом-наблюдателем и

достаточного числа гидировочных звезд для повторного наведения.

Говорят, что весь этот процесс подобен поиску иголки в стогу сена. Вернее будет уподобить эту задачу просьбе провести машину 5000 км и остановить ее с точностью до дюйма на заранее известной стоянке.

5.4. Телеметрия и связь

Возможности наших систем связи определяются спутниковой системой слежения и ретрансляции. Исходя из них, мы проектировали системы для передачи команд, технических и научных данных.

Антенны с низким усилением обеспечивают постоянный канал связи малой емкости (4 кбит/с), позволяющий связаться

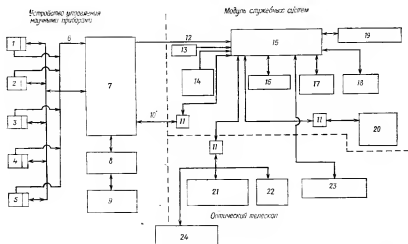


Рис. 15. Даже на этой сокращенной диаграмме бортовая система обработки данных состоит из множества компонентов. В состав научных приборов 1—5, датчиков точного гидирования 22 и оптического контроля 21 входят микропроцессоры. 1 — спектрограф слабых объектов; 2 — широкоугольная камера; 3 — скоростной фотометр; 4 — спектрограф высокого разрешения; 5 — камера слабых объектов; 6 — научные данные; 7 — узел формирования телеметрических данных с научных приборов; 8 — стандартный интерфейс; 9 — ЭВМ научных приборов; 10 — технические данные; 11 — интерфейс передачи телеметрической информации; 12 — научные данные; 13 — часы; 14 — магнитофоны для записи научных данных; 15 — устройство обработки данных; 16 — ЭВМ спутника; 17 — магнитофон для записи технических данных; 18 — аварийный магнитофон; 19 — система связи; 20 — другое бортовое оборудование модуля служебных систем; 21 — подсистема контроля оптики; 22 — подсистема точного гидирования; 23 — гироскопы и звездные датчики; 24 — другие подсистемы телескопа.

с КТ независимо от его ориентации и получать основные технические данные (показатели нормальной работы спутника) и небольшие объемы научной информации, с единственным ограничением, связанным с зоной видимости спутников-ретрансляторов. Такая возможность очень важна для контроля за состоянием КТ и в случае возникновения неисправности, когда аппарат автоматически переходит в один из своих аварийных режимов.

Для передачи информации, записанной на магнитофоны, и облегчения взаимодействия с наблюдателем в реальном времени служит канал связи с высокой емкостью. Все данные с научных приборов поступают на ЭВМ для управления приборами и сбора данных, представляющую собой вычислительную систему NSSC-1, создаваемую фирмой «ИБМ». Затем информация подается либо непосредственно на передатчики, либо на один из трех магнитофонов, входящих в оборудование спутника (рис. 15). На каждом из них помещается 10^9 бит информации, что достаточно для хранения нескольких кадров широкоугольной камеры (этот инструмент дает гораздо больше данных, чем другие). На трех магнитофонах может храниться намного больше данных, чем предполагается получить в промежутках между передачами, и здесь основное преимущество заключается в резервировании на случай неизбежных поломок.

5.5. Система энергоснабжения и термостатирование

Основу системы энергоснабжения составляют поворотные солнечные батареи, разрабатываемые для КТ Европейским космическим агентством. Их средняя по орбите мощность составит примерно 4700 Вт в момент выведения и не менее 4000 Вт после двух лет работы. Из-за периодического захода в тень на низкой орбите требуется накапливать электроэнергию, что обеспечивается пятью аккумуляторами. Разряд каждого аккумулятора не превышает 20 % емкости, что должно сохранить работоспособность большей их части в течение 2,5 лет — номинального интервала между проведением техобслуживания (аккумуляторы можно заменить на орбите). Распределение электроэнергии между потребителями показано на рис. 16. Большая ее часть используется для контроля и работы спутника и научных приборов. Однако заметная доля потребляется термостатами.

При входе и выходе КТ в освещенную Солнцем и Землей зону на каждом витке резко меняется приток лучистой энергии, что не должно сказаться на качестве работы телескопа. Электронные компоненты работают только в определенном проектном интервале температур, смазка на движущихся частях (гироскопах, решетках, дисках со светочувствительными пленками) может стать

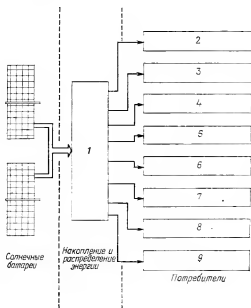


Рис. 16. Схема энергоснабжения КТ, показаны направления передачи электроэнергии и уровни ее потребления. Проект этой части спутника тесно связан с системой терморегулирования. 1 — модуль служебных систем; 2 — приборы модуля обслуживающих систем, 1058 Вт; 3 — оборудование телескопа, 592 Вт; 4 — широкоугольная камера, 120 Вт; 5 — камера слабых объектов, 150 Вт; 6 — спектрограф высокого разрешения, 143 Вт; 7 — спектрограф слабых объектов, 135 Вт; 8 — скоростной фотометр, 135 Вт; 9 — управление и обработка данных с научных приборов, 82 Вт. Полная нагрузка КТ — не более 2160 Вт, мощность в электросети 2379 Вт при высоте орбиты 593 км и наклоне 28,5°. Мощность солнечных батарей через 2 года — 4000 Вт. Общее энергопотребление научных приборов — не более 428 Вт.

чересчур вязкой или, наоборот, жидкой, а детали (в том числе зеркала) могут деформироваться. Использованы все возможности для пассивного управления температурой КТ, в частности, с помощью соответствующей теплоизоляции с учетом истинного времени теплообмена деталей. Температуру некоторых критических узлов нельзя поддерживать пассивно, и они снабжены термостатами с нагревателями. Вот некоторые из них. Рабочая температура роторов гироскопов должна быть высокой и в точности постоянной. Главное и вторичное зеркала будут поддерживаться при температуре, близкой к температуре в оптическом цеху, где они изготовлялись (20 °C), с целью уменьшить искажения поверхности и предотвратить поглощение (холодных) вредных газов. Наконец, термостаты имеются также на трубе телескопа из композиционного материала и ферме, к которой

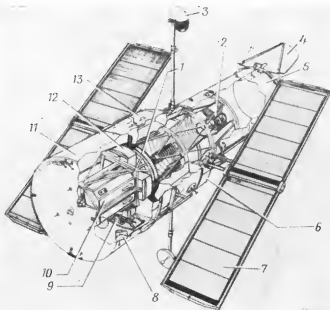


Рис. 17. Общий вид КТ в разрезе. 1 — главное зеркало; 2 — вторичное зеркало; 3 — остронаправленная антенна; 4 — крышка на апертуре; 5 — затенение; 6 — оборудование оптического телескопа; 7 — две вращающиеся солнечные батареи; 8 — три неподвижных звездных датчика; 9 — радиальный научный прибор с радиатором; 10 — четыре аксиальных научных прибора; 11 — боковая обложка; 12 — три датчика точного гидрирования и контроля оптики; 13 — приборный отсек.

крепятся научные приборы, датчики контроля оптики и датчики точного гидрирования. Вероятно, многие из этих мер не нужны при обычных наблюдениях, но все-таки они гарантируют нам высокое качество работы.

Общий проект спутника, выполненный в соответствии с изложенными в этом разделе соображениями, показан на рис. 17.

6. Научные приборы

После выведения КТ на орбиту выбор наблюдателей и полученных ими результатов будет зависеть от установленных там научных приборов. До сих пор я сосредоточивал внимание на телескопе и на том, как дойти до того счастливого момента, когда он будет надежно работать. Теперь позвольте перейти к научным приборам, то есть к устройствам, преобразующим телескопические изображения в полезную научную информацию.

Как уже указывалось, в период подготовки предварительного

проекта КТ (фаза В) в качестве его научных приборов рассматривалось много кандидатов. Они оценивались как с точки зрения поиска разумных технических решений, так и с точки зрения требований к обсерватории. Привлекавшиеся в фазе В ученые выбирались по конкурсу из тех, кто откликнулся на открытое предложение об участии в проекте. Их решили объединить в научные группы, что и было сделано, но вскоре сформированные таким образом группы стали сторонниками определенных научных приборов, наилучшим образом подходивших к их собственной области исследований. Почти все идеи и, конечно, все требования к приборам родились в этих группах, хотя проектирование вели подрядчики КТ.

Ученых, занятых этой работой, распределили на шесть групп разработки приборов: астрометрическую, обработки данных, ИК-наблюдений, спектроскопии слабых объектов, спектроскопии с высоким разрешением и панорамных наблюдений. Группа обработки данных не отвечала за какой-либо конкретный прибор, но уже тогда было ясно, что от обработки данных существенно будут зависеть все приборы. Каждая группа немало потрудилась, чтобы сформулировать реалистичные, но достаточно высокие показатели качества, а потом помогла подрядчикам воплотить эти идеи в проектах. Обе спектроскопические группы и группа ИК-наблюдений представили по одному простому прибору. Группа панорамных наблюдений сначала работала над многоцелевой камерой, но потом разделила функции, когда выяснилось, что Европейское космическое агентство тоже хочет подготовить камеру. Астрометрическая группа спроектировала-таки устройство измерения координат, но когда приняли во внимание его ограничения и количественно оценили астрометрический потенциал системы точного гидирования, группа переключилась на оптимизацию проекта этой системы.

Выбор светоприемника является определяющим во всех проектах. Бесспорным лидером считался секон, разрабатывавшийся уже несколько лет в Принстонском университете. Эта передающая телевизионная трубка была в то время лучшим светоприемником, хотя трудности с ее низким разрешением и ограниченным динамическим диапазоном были хорошо известны. В ЕСА считали, что, исходя из собственного опыта, могут предложить лучший вариант.

У каждой группы разработки приборов имелись свои первоочередные задачи, и полный набор возможных приборов намного превосходил ресурсы места, веса и средств. По этой причине пришлось разработать некоторую процедуру выбора. Естественно было поручить выбор Рабочей группе управления полетом КТ с привлечением руководителей приборных групп и других видных специалистов.

Рабочая группа выделила три базовых научных прибора, заявив, что они самые важные и без них КТ не может считаться обсерваторией в полном смысле слова. Этими приборами были широкоугольная камера, спектрограф слабых объектов и камера высокого разрешения (предполагалось, что ее сделают европейцы). Более того, Рабочая группа рекомендовала не запускать КТ без базовых приборов, игнорируя гипотетическую ситуацию: поломку одного из приборов непосредственно перед стартом, когда задержка обходится крайне дорого.

Все эти исследования и рекомендации учитывались при планировании следующей фазы программы — изготовлении аппаратуры. Было решено выбрать совершенно новые научные группы, каждая из которых отвечала бы за свой прибор. Для этого сделали запрос предложений в виде циркулярного письма, обрисовывавшего представляющиеся возможности и ограничения. От тех, кто на него откликнется, рассчитывали получить описание научных задач и прибора, который будет для этого создан.

Руководству НАСА, возглавлявшему процесс отбора кандидатов, пришлось решить проблему, связанную с рекомендацией обязательно включить три базовых научных прибора. Если ими уже занято три из пяти приборных отсеков обсерватории, то могут быть выбраны еще только два прибора (установка камеры слабых объектов ЕСА уже была гарантирована). Предстояло распределить средства, остающиеся на долю двух выбираемых приборов. По решению НАСА группы, разрабатывающие широкоугольную камеру и спектрограф слабых объектов, будут делать выбор, если поступят приемлемые предложения, а остальные отсеки будут заполнены на основе свободного соперничества; однако после того, как выбор сделан, все приборы должны финансироваться одинаково. Полученные предложения анализировались на предмет осуществимости, стоимости и влияния на проект обсерватории. Материалы анализа послужили основой для оценки научной стороны предложений образованными с этой целью группами ученых. Они были организованы по специальностям и сделали рекомендации, которые были рассмотрены в совокупности группой рецензентов, свободных от влияния личных интересов. Их очень трудно было подобрать, поскольку большинство астрономических учреждений США представили свои предложения.

Были выбраны руководители групп разработки четырех научных приборов, представитель США в группе ЕСА по подготовке камеры слабых объектов и руководитель астрометрической группы. Из представителей группы каждого прибора сформировалась группа обработки данных, для которой также был выбран руководитель (табл. 2). Приборами КТ стали широко-

Таблица 2

Научные сотрудники рабочей группы КТ

Сотрудник	Организация	Должность
Джон Н. Баколл	Институт перспективных исследований	Специалист по междисциплинарным проблемам
Роберт К. Блесс	Висконсинский университет	Ведущий разработчик скоростного фотометра
Джон К. Брандт	Центр космических полетов им. Годдарда	Ведущий разработчик спектрографа высокого разрешения
Джон Дж. Колдуэлл	Нью-Йоркский университет, Стоун-Брук	Специалист по междисциплинарным проблемам
Уильям Г. Фастн	Университет им. Джона Хопкинса	Специалист по телескопу
Эдвард Дж. Грос	Принстонский университет	Руководитель группы обработки данных
Ричард Дж. Хармс	Калифорнийский университет, г. Сан-Диего	Ведущий разработчик спектрографа слабых объектов
Уильям Г. Джеффрис	Техасский университет, г. Остин	Руководитель астрометрической группы
Дэвид Л. Лэмберт	Техасский университет, г. Остин	Специалист по междисциплинарным проблемам
Дэвид С. Лекроуи	Центр космических полетов им. Годдарда	Специалист по научным приборам
Малькольм С. Лонгейр	Королевская обсерватория, г. Эдинбург, Великобритания	Специалист по междисциплинарным проблемам
Ф. Дуччо Маччетто	ЕСА, г. Нордвийк, Нидерланды	Ведущий разработчик проекта камеры слабых объектов
Ч. Р. О'Делл	Центр космических полетов им. Маршалла	Ведущий разработчик проекта
Нэнси Дж. Роман	Руководство НАСА	Специалист группы планирования (ушла с этого поста)
Дэниэл Дж. Шрёдер	Белойтский колледж, г. Белойт, шт. Висконсин	Специалист по телескопу
Г. К. ван де Хюлст	Лаборатория им. Гюйгенса, г. Лейден, Нидерланды	Руководитель группы разработки камеры слабых объектов
Роберт У. Хоббс	Центр космических полетов им. Годдарда	Специалист по обработке данных
Эдвард Дж. Вейлер	Центральное управление НАСА	Специалист группы планирования
Джеймс А. Вестфал	Калифорнийский технологический институт	Ведущий разработчик широкоугольной камеры

угольная камера, спектрограф слабых объектов, спектрограф высокого разрешения и скоростной фотометр [2].

Ко всеобщему удивлению, не был выбран ни один из бывших руководителей групп (в фазе В), за исключением начальника группы обработки данных, который возглавил разработку не изучавшегося в фазе В скоростного фотометра. Более того, в реальном полете не задействовали ни одного из рассмотренных в фазе В светоприемников! Этот факт должен кое-чему научить, потому что квалификация ученых и инженеров в фазе В была не ниже, чем при окончательном выборе. Важную роль сыграло большое время, прошедшее между двумя конкурсами.

В фазе В предложения поступали от тех, кто откликнулся на запрос 1973 г. с имевшимися тогда идеями, особенно в области светоприемников. Ввиду затянувшейся работы в фазе В они не смогли следить за новейшими разработками или по крайней мере отказаться от своих старых предложений. Следовательно, в 1977 г. выбирались самая передовая технология и самые свежие идеи, с которыми трудно было свыкнуться. Если бы длительность фазы В была короче, как и предполагалось сначала, все могло сложиться совершенно иначе.

6.1. Широкоугольная камера

Широкоугольную камеру (ее иногда называют планетной) разрабатывает в Калифорнийском технологическом институте Дж. Вестфал. Она будет давать изображения центральной части поля зрения КТ форматом 1600×1600 элементов при светосилах 1:12,9 (поле $2,67' \times 2,67'$) и 1:30 (поле $68,7'' \times 68,7''$). Светоприемниками служат 800×800 -элементные приборы с зарядовой связью, охлаждаемые термоэлектрически до -95°C . Камера крепится в радиальном приборном отсеке и имеет внешний радиатор, выступающий за пределы корпуса спутника (рис. 18).

При обеих светосилах пучок подается в камеру с помощью поворотной пирамиды, которая также делит поле зрения на четыре равных сектора, направляя их на отдельные светоприемники. В системах разной светосилы светоприемники снабжены индивидуальной перебрасывающей оптикой; следовательно, всего имеется восемь оптических каналов регистрации (рис. 19). В варианте со светосилой 1:12,9 размер элемента изображения намеренно завышен (он равен $0,10''$), но это дает выигрыш в размере поля зрения. Система 1:30 будет регистрировать более слабые объекты с более высоким разрешением в поле меньшего размера.

Сердцем прибора являются приборы с зарядовой связью. Они обладают очень низким тепловым шумом и шумом считывания.

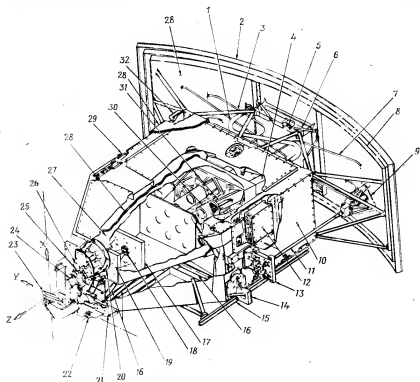


Рис. 18. Широкоугольная камера в разрезе. X, Y, Z — оси спутника (ось X направлена вперед, Z — на солнечную сторону). 1 — газотводная трубка; 2 — радиатор; 3 — стрингеры крепления радиатора; 4 — узел ПЗС-камеры; 5 — разъем для контроля; 6 — стрингеры крепления радиатора к отсеку; 7 — тепловые трубки; 8 — светонепроницаемый кожух; 9 — треугольная ферма крепления; 10 — отделение для электроники; 11 — стержень крепления к замку; 12 — электронный блок; 13 — плата крепления разъемов; 14 — посадочное место, точка «С»; 15 — направляющая; 16 — стрингеры крепления оптической скамьи; 17 — плата из инвара; 18 — пирамида; 19 — изламывающие зеркала; 20 — селектор фильтров (48 фильтров); 21 — посадочное место, точка «А»; 22 — замок защитного покрытия; 23 — перехватывающее зеркало; 24 — входное отверстие; 25 — механизм закрывания входного отверстия; 26 — затвор; 27 — оптическая скамья из графито-эпоксидного композита; 28 — многослойная теплоизоляция; 29 — узел крепления к телескопу; 30 — бленда; 31 — узел пересбрасывающей оптики; 32 — крепежное кольцо.

вания и широким спектральным диапазоном. Красная граница заведомо дальше 1 мкм и определяется собственной чувствительностью кремния. Чувствительность в ультрафиолетовой области расширена за счет покрытия передней поверхности приемников коронином — прозрачным веществом, эффективно

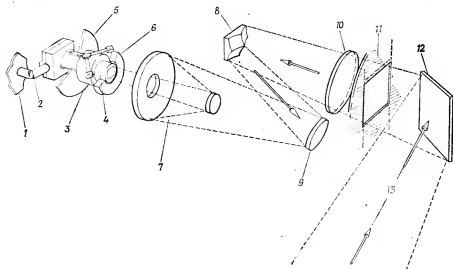


Рис. 19. Оптическая схема широкоугольной камеры, на которой показаны выделенный для нее участок поля зрения и способ его переброски на ПЗС-приемник. 1 — внешний радиатор; 2 — тепловая трубка; 3 — полоски для юстировки ПЗС; 4 — узел ПЗС; 5 — плата с электроникой; 6 — блenda; 7 — переизображающая оптика системы Ричи—Кретьена; 8 — пирамида; 9 — плоское перебрасывающее зеркало; 10 — фильтр; 11 — затвор; 12 — зеркало, перехватывающее пучок; 13 — оптическая ось телескопа.

преобразующим фотоны в видимый свет, который может регистрировать кремний.

Широкоугольная камера представляет собой мощный научный прибор, способный работать одновременно с другими. Кроме регистрации изображений со светофильтрами на ней можно будет выполнять бесщелевую спектроскопию и поляризационные наблюдения.

6.2. Камера слабых объектов

Камера слабых объектов, которую сделает Европейское космическое агентство, является, по-видимому, наиболее универсальным прибором КТ [5]. Ее основная задача — передавать изображения малых площадок со светосилами 1:48 (поле 22"×22") и 1:96 (поле 11"×11"). В особых случаях она будет регистрировать очень малые области при светосиле 1:288, двумерные щелевые спектры, бесщелевые спектры и поляризацию (рис. 20).

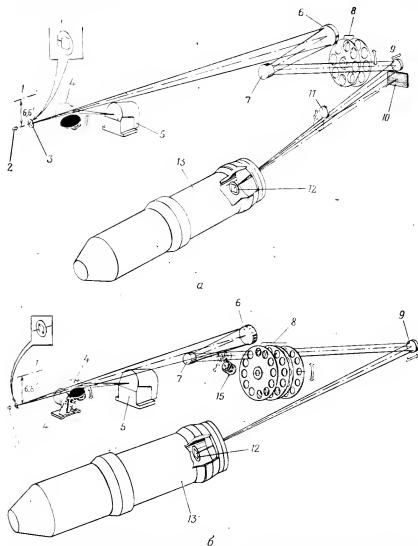


Рис. 20. Схема камеры слабых объектов и разных вариантов ее работы. а — система с эквивалентной светосилой 1:48; б — другая система со светосилой 1:96. 1 — оптическая ось КТ; 2 — падающий пучок света; 3 — диафрагма в фокусе со щелью; 4 — вводимый затвор с зеркалом; 5 — калибровочный источник; 6 — главное зеркало; 7 — вторичное зеркало; 8 — диски с фильтрами; 9 — изламывающее зеркало и его фокусирующее движение; 10 — неподвижная дифракционная решетка; 11 — вводимое зеркало; 12 — фотокатод; 13 — светоприемник; 14 — диафрагма в фокусе с коронографическими масками; 15 — вводимая кассегреновская комбинация с аподизирующим экраном для получения светосилы 1:288.

Приемником света служит передающая телевизионная трубка с облучаемой электронами кремниевой мишенью, установленная после трехкаскадного ЭОПа. В отличие от ПЗС-приемников широкоугольной камеры здесь считаются отдельные фотоны. Каждый выбитый из первого фотокатода фотоэлектрон преобразуется в большой импульс света, падающий на телекамеру. Положения импульсов определяются и запоминаются последовательно, и один за другим накапливаются биты изображения. В такой системе быстро достигается насыщение по потоку, хотя ее способность регистрировать отдельные фотонные события оптимальна. Первый фотокатод двухщелочной, он чувствителен к излучению от ультрафиолетового предела пропускания телескопа до примерно 6000 Å.

Благодаря большому фокусному расстоянию в камере слабых объектов каждое построенное телескопом изображение соответствует нескольким элементам разрешения, что позволяет получать изображения с наивысшим возможным разрешением и наибольшим контрастом на фоне неба. Следовательно, прибор будут использовать в тех случаях, когда требуется наивысшее разрешение. Работа при светосиле 1 : 288 позволит с помощью коронографических приемов проводить поиск слабых компонентов (планет?) около ярких звезд и разрешить спеклы в ультрафиолете. Возможности спекл-интерферометрии очень велики, потому что в ультрафиолетовом диапазоне дифракционный предел разрешения гораздо лучше, чем в видимом, а ожидаемая скорость изменения спекл-структуры мала, что дает возможность применить метод даже к слабым источникам.

Большой масштаб изображения позволяет регистрировать на камере слабых объектов более слабые источники, чем на широкоугольной. Однако на длинах волн более 5500 Å ПЗС-приемники гораздо чувствительнее двухщелочного фотокатода камеры слабых объектов. Эти два прибора взаимно дополняют друг друга; их функции в действительности не дублируются, но достаточно близки, обеспечивая альтернативные варианты в случае полного отказа одного из приборов.

6.3. Спектрограф для слабых объектов

На спектрографе для слабых объектов можно наблюдать с разрешением 10^2 — 10^3 объекты, столь же малые, как и изображения КТ, что благоприятствует измерениям очень слабых источников и компактных компонентов в ярких протяженных источниках. Его оптическая схема выбрана вследствие своей простоты и эффективности (рис. 21). В пучок может вводиться анализатор линейной поляризации для проведения спектрополя-

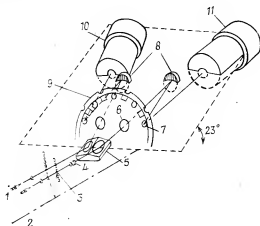


Рис. 21. Оптическая схема спектрографа слабых объектов. 1 — падающий пучок света; 2 — оптическая ось КТ; 3 — узел входных диафрагм; 4 — поляризатор; 5 — зеркало скользящего падения; 6 — фильтр; 7 — сферические решетки; 8 — внеосевые параболические коллиматоры; 9 — диск с решетками и фильтрами; 10 — диджикон с мультищелочным фотокатодом на кварцевом окошке; 11 — диджикон с двухщелочным фотокатодом и входным окошком из MgF_2 .

риметрических измерений, в остальном же это очень простой прибор. Его наиболее необычная особенность — отклонение расходящегося пучка, прошедшего сквозь входную диафрагму, зеркалом скользящего падения. Это позволяет расположить входные диафрагмы вблизи оптической оси КТ, где очень мало места, и в то же время иметь большие решетки и приемники света (рис. 22).

Оба светоприемника являются 512-канальными диджиконами, различающимися только по спектральной чувствительности. Они представляют собой линейку из 512 кремниевых диодов, на которые падают ускоренные электроны, испущенные мультищелочным или двухщелочным катодом. Тем самым обеспечивается область чувствительности от границы отражения зеркал КТ до примерно 7000 Å. Фон неба вычитается отклонением электронного изображения, когда на диоды проектируются участки по обе стороны от спектра. Это будет высокочувствительная система, подобная некоторым уже действующим на Земле, и с ней чаще всего будут наблюдать на КТ. Ее разрабатывает в Калифорнийском университете (г. Сан-Диего) Р. Дж. Хармс со своими сотрудниками.

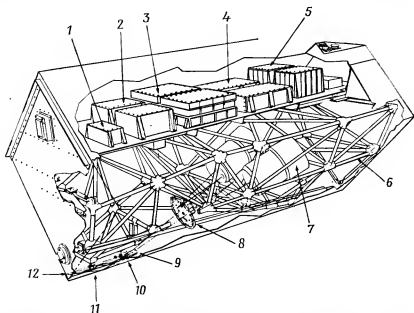


Рис. 22. Спектрограф слабых объектов в разрезе, установленный в стандартном отсеке для аксальных научных приборов. 1 — блок питания калибровочного источника; 2 — высоковольтный источник питания; 3 — центральный источник питания; 4 — микропроцессор; 5 — электронный блок обработки сигнала; 6 — оптическая скамья из графито-эпоксидного композита; 7 — диджикон; 8 — диск с фильтрами и решетками; 9 — зеркало скользящего падения; 10 — анализатор поляризации; 11 — входные диафрагмы; 12 — входные отверстия.

6.4. Спектрограф высокого разрешения

Назначение спектрографа высокого разрешения совершенно иное, нежели у спектрографа слабых объектов — он служит для ультрафиолетовых наблюдений с беспрецедентно высоким спектральным разрешением. Имеются три диапазона по разрешению: $1,2 \cdot 10^5$, $2 \cdot 10^4$ и $2 \cdot 10^3$. Длинноволновая граница регистрируемого излучения будет около 3200 Å, а коротковолновая — за линией $\text{L}\alpha$, поскольку для наиболее полного использования света, отраженного алюминированными зеркалами КТ, покрытыми MgF_2 , входное окно одного из приемников будет выполнено из LiF .

На турели размещены как работающие в первом порядке дифракционные решетки сравнительно низкого разрешения, так и эшел с наивысшим разрешением. Светоприемниками также служат диджиконы с несколько более длинными (поперек дис-

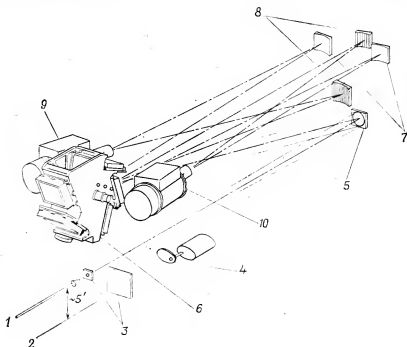


Рис. 23. Схема спектрографа высокого разрешения, иллюстрирующая наиболее эффективный метод проектирования универсального спектрографа высокого разрешения минимального объема. 1 — падающий пучок света; 2 — оптическая ось КТ; 3 — входные щели; 4 — заслонка для широкой щели; 5 — внеосевой параболитический коллиматор; 6 — турель для выбора решеток и камерных зеркал; 7 — вогнутые камерные зеркала; 8 — вогнутые кросс-диспергирующие решетки; 9 — диджикон с фотокатодом CsTe на подложке из MgF_2 ; 10 — диджикон с фотокатодом CsI на подложке из LiF.

персии) элементами, чем в спектрографе слабых объектов. Спектры низкого разрешения гораздо длиннее входного окна диджикона, поэтому наблюдаемую область нужно устанавливать наклонном решеток. У эшли спектры короче, зато много порядков, и для их разделения применяется кросс-диспергирующая решетка (рис. 23). Нужный порядок выбирают магнитным отклонением в диджиконе. Имеется чисто зеркальная система проекции малого участка поля зрения на диджикон, облегчающая поиск источников при работе с малой входной диафрагмой. Спектрограф высокого разрешения разрабатывает группа под руководством Дж. К. Брандта в Центре космических полетов им. Годдарда.

6.5. Скоростной фотометр

Включение скоростного фотометра в число научных приборов КТ было неожиданностью. Первоначально его предложил Р. К. Блесс из Висконсинского университета в качестве необязательного дополнения к иному прибору; теперь для фотометра выделен отдельный стандартный приборный отсек. Он принципиально прост, потому что лишен механических движущихся частей и состоит из четырех диссекторов и одного фотоумножителя (рис. 24). Перед каждым диссектором установлены маска для сужения поля зрения и несколько небольших фильтров, так что он освещается сквозь несколько комбинаций диафрагм и фильтров. Наблюдаемый объект устанавливают в нужное место с помощью системы наведения телескопа, и диссектор воспринимает фотоэлектроны с соответствующего участка. Аналогичная оптическая система питает фотоумножитель. Диапазон спектральной чувствительности простирается от 1150 до 6500 Å. Можно также измерять линейную поляризацию в ультрафиолетовой области. Этот прибор обладает характерной для фотометров высокой эффективностью и позволяет наблюдать с очень высоким разрешением по времени, до 16 мкс, что дает возможность воспользоваться на КТ отсутствием шумов при прохождении светового потока от ярких объектов — звезд и планет¹.

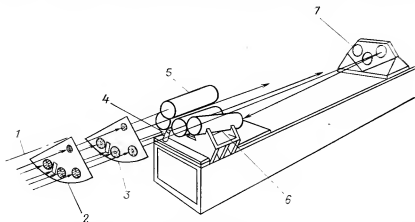


Рис. 24. Скоростной фотометр является простейшим из научных приборов, в нем нет движущихся частей (кроме электронов). 1 — оптическая ось телескопа; 2 — узел фильтров; 3 — узел входных диафрагм; 4 — фотоумножитель; 5 — диссектор прямого пучка; 6 — диссекторы для переброшенных световых пучков; 7 — эллипсоидальные перебрасывающие зеркала.

¹ Быстрая фотометрия ярких объектов в наземных условиях ограничена атмосферным мерцанием («шумом»). — *Прим. перев.*

6.6. Датчики точного гидирования

Датчики точного гидирования могут использоваться также для астрометрических измерений и по своим функциям представляют собой шестой научный прибор. Эта возможность обусловлена исключительной жесткостью требований к наведению и гидированию, соответствующей астрометрическим стандартам точности. Для стабилизации КТ необходимы всего два датчика точного гидирования, третий остается свободным для астрометрических наблюдений. Их возможности весьма ограничены малой площадью поля зрения (всего 68 квадратных минут дуги), но позволяют определить много параллаксов и собственных движений. Согласно проекту, требуется, чтобы датчик точного гидирования измерял расположение пары звезд до 17-й величины с точностью $2 \cdot 10^{-3}''$ и со скоростью 10 звезд за 10 мин. Можно будет измерить точные положения звезд до 20-й звездной величины. С помощью нейтральных фильтров могут наблюдаться и звезды до 4-й величины. Более того, мы рассчитываем при сканировании звезд датчиком точного гидирования выявлять их двойственность. Астрометрическую группу возглавляет У. Г. Джеффрис из Техасского университета (г. Остин).

7. Организация наблюдений

Проблема организации наблюдений и использования КТ сравнима по сложности с его созданием. Во многих отношениях ее даже труднее решать, потому что больше внимания требуется для согласования, часто возникают проблемы политики и взаимоотношений, и все отдают себе отчет в том, что выработанные процедуры будут изменены после запуска спутника, когда станут известны его реальные характеристики. Уже определены основные особенности системы управления и заключены первые контракты. Однако эта часть работы вполне естественно будет последним этапом разработки КТ.

Организация наблюдений определяется прежде всего двумя факторами: степенью автоматизации спутника и методом распределения времени; как мы увидим, они взаимосвязаны. Некоторая степень автоматизации необходима, потому что из-за перегруженности ретрансляционных спутников мы предполагаем иметь прямую связь с КТ только в течение 20 мин на каждом витке. Без автоматизации мы могли бы менять положения деталей, установку решеток и т. д. только в определенные периоды общей длительностью 20 %, что привело бы к значительной потере наблюдательного времени. В таком случае возникает вопрос: какова требуемая степень автоматизации? Для повышения научной отдачи система должна работать самостоятельно

24 ч в сутки. Чтобы обеспечить максимальную гибкость, система управления должна допускать участие наземного наблюдателя в наведении на 20 % объектов и просмотр части полученных данных в реальном времени для контроля процесса наблюдений. В некоторой степени этот метод применяется в работе системы VLA, однако КТ — еще более универсальный и сложный прибор. Крупные наземные оптические телескопы становятся полуавтоматизированными, чтобы работать эффективнее, но в этом отношении КТ пойдет гораздо дальше.

Метод распределения наблюдательного времени является большим вопросом, поскольку он затрагивает и научные традиции, и сложные проблемы управления научными приборами и спутником. По традиции у наземных наблюдателей время выделялось раньше; как говорят в НАСА, «поблочно». Это означает, что одному астроному предоставляли полную ночь, несколько ночей подряд или целый безлунный период на крупном телескопе. Он вправе использовать время с большей или меньшей эффективностью, менять навесные приборы по собственному усмотрению (теоретически) и корректировать свою программу в соответствии с новыми данными. Эта система начинает изменяться, по мере того как телескопы становятся работоспособными большую часть суток, путешествия в отдаленные обсерватории занимают все меньше времени, а скорость сбора информации возрастает. На КТ наблюдения могут вестись непрерывно, их процедура жестко ограничена, а желающих наблюдать очень много. По этим причинам мы будем распределять время «интегрально», то есть так, что различные виды наблюдений чередуются наиболее эффективно. Это не исключает участие наблюдателя, но все-таки использование КТ будет планироваться заранее, и возможность изменения ограничена модификацией программ, требующих немедленной оценки результатов и настройки.

7.1. Научный институт

Научной работой КТ будет руководить специальная организация, не принадлежащая к системе НАСА и непосредственно подчиняющаяся сообществу настоящих и будущих наблюдателей обсерватории. Такой подход соответствует первой официальной рекомендации по работе КТ [7], хотя вопрос управления не рассматривался в течение многих лет и ее забыли. С началом планирования наблюдений эта идея сама собой возродилась, и американские ученые ее охотно поддержали.

Цель заключается в том, чтобы всю полноту ответственности и руководства научной работой КТ возложить на самих наблюдателей. Для этого отобраны по конкурсу университеты,

объединяющиеся и организующие Научный институт КТ. Подобный принцип успешно применяется для управления другими крупными национальными установками как в области астрономии, так и в физике высоких энергий. Однако у КТ есть важные отличия: он связан с аэрокосмической техникой, для разработки которой уже существует постоянно действующая организация — НАСА. Если бы Научный институт взялся за разработку КТ, ему пришлось бы временно дублировать основные части уже имеющейся структуры. Следовательно, разработку и обслуживание КТ осуществляет НАСА, а его использованием в научных целях занимается институт. НАСА располагает также развитой системой управления, которая без труда может обслуживать КТ, поэтому не нужно создавать огромных систем связи и управления спутниками. Мы думаем, что взаимодействие с НАСА, решение научных вопросов и экономия средств потребуют немало усилий.

Главными функциями Научного института КТ будут отбор наблюдателей, выработка программы, проведение наблюдений, организация параллельных наблюдений на других приборах, обработка и распределение данных и научно-исследовательская работа сотрудников. Отбор наблюдателей является первоочередной задачей, поскольку спрос должен намного превысить предложение. Важными критериями будут мнение коллег и осуществимость. Планирование — это постепенная подготовка все более детальной программы наблюдений, завершающаяся составлением суточных заданий, которые могут быть выполнены звеном управления спутника в НАСА. Проведение наблюдений заключается в контроле за автоматической работой КТ, прямом взаимодействии с НАСА в случаях наведения на трудные объекты, контроле потока научной информации и внесении необходимых изменений в программу. В параллельных наблюдениях будет реализована возможность одновременной работы нескольких научных приборов. В некоторых случаях это будет делаться в соответствии с конкретными наблюдательными задачами. Иногда это будет просто попыткой собрать возможно большее количество научной информации, которой сможет немедленно воспользоваться любой ученый. Обработка данных включает в себя операции над поступающей с КТ информацией (от научных приборов и датчиков точного гидирования) и переработку первичной информации (принимаемой в течение суток после наблюдений) в полезные научные данные, прокалиброванные и преобразованные в удобную, легко воспринимаемую форму. Хранение данных связано с запоминанием всей научной информации в подходящем виде, что особенно важно, так как все наблюдения КТ будут предоставляться в распоряжение любого имеющего на это право астронома через год после того, как

прокалиброванные наблюдения поступили к исходному наблюдателю.

Это учреждение будет соответствовать по масштабу другим американским организациям наземной астрономии и действовать, под руководством Ассоциации университетов по астрономическим исследованиям, размещающейся в г. Балтиморе (шт. Мэриленд) в Университете им. Джона Хопкинса. Трудности организации этого нового института огромны, но его научный потенциал еще больше.

7.2. Ограничения на программу наблюдений

Наземные наблюдатели оптического диапазона привыкли распределять свое время работы на телескопе в соответствии с естественными ограничениями: дневное и ночное, лунное и безлунное, сезонные изменения продолжительности ночи, поворот Земли в течение ночи и т. д. На КТ придется учитывать аналогичную совокупность ограничений. Поскольку телескоп выведен на низкую орбиту, он будет каждые 100 мин переходить из освещенного полушария в темное и в любой момент ему будет доступна область неба размером, превышающим 2π стер. Если требуется обеспечить минимум рассеянного света, то нужно соблюдать дополнительные условия, чтобы линия визирования проходила не ближе 50° от Солнца, 70° от освещенной части Земли и 15° от Луны. Кроме того, нужно также учитывать прохождение зоны высокой радиации в Южно-Атлантической аномалии, где ни один из существующих научных приборов КТ не способен регистрировать данные.

Типичная картина доступной в данный момент области неба показана на рис. 25. Изображены в проекции участки небесной сферы, где можно вести наблюдения с малой засветкой, и показана их длительность. В тех случаях, когда фон неба не регистрируется или объект находится в области яркого зодиакального света, время наблюдений будет намного больше, а допустимая зона расширяется. Любопытно, что, как видно из рисунка, имеются две зоны непрерывных наблюдений около полюсов орбиты КТ.

Эта картина непрерывно меняется вследствие обращения Земли вокруг Солнца и прецессии орбиты. Благодаря движению Земли центр зоны оптимальных наблюдений перемещается за год на 360° , в точности так же, как при наземных наблюдениях, когда есть «зимние» и «летние» созвездия. Прецессия орбиты приводит к меньшим последствиям, восходящий узел смещается на 7° в сутки, и соответственно сдвигается зона непрерывных наблюдений.

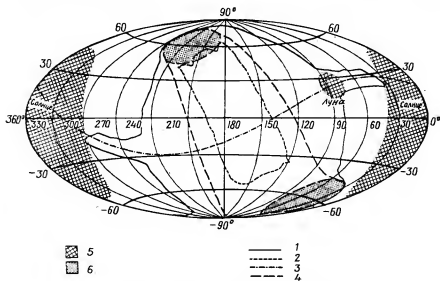


Рис. 25. На любой заданной орбите на КТ можно наблюдать разные части небесной сферы в течение разного времени. Изохроны показывают участки неба, где можно полностью подавить рассеянный свет в течение 30 мин (1) и 45 мин (2). Некоторые области недоступны из-за близости Солнца или Луны (5), а некоторые могут наблюдаться непрерывно на всем витке (6); 3 — плоскость орбиты; 4 — полностью затененная область.

Кроме ограничений, связанных с орбитой, есть и такие, которые обусловлены характеристиками спутника. Наиболее важными параметрами являются время наведения на объект и время наблюдений на различных научных приборах. В одном из предыдущих разделов я описал, каким образом КТ наводят в разные участки неба и как находят новый объект. Если бы это делалось мгновенно, то можно было бы представить себе, как на каждом витке КТ «скачет» по небу, не теряя даром ни минуты; на самом деле такого не будет. Перевод на новый объект занимает около двух минут, если он находится недалеко. Если же объект удален, то начинает играть роль скорость установочного движения. Ее максимальное значение 15° в минуту достигается с ускорением около $0,048^\circ/(\text{мин})^2$, и в том же темпе телескоп замедляется. Следовательно, вполне естественно группировать близкие объекты, чтобы повысить эффективность наблюдений. Другое важное ограничение, связанное с продолжительностью наблюдений, вызвано тем, что из-за выделения тепла и нехватки электроэнергии все пять приборов не могут работать одновременно. По этой причине запланировано три

режима готовности приборов: рабочий, режим ожидания и аварийный режим, необходимый только в случае серьезных неисправностей на спутнике. Мы приняли в качестве рабочего правила, что широкоугольная камера всегда должна находиться в рабочем режиме, даже при наблюдениях на научных приборах, размещенных на оптической оси, а другие будут пребывать в режиме ожидания. В некоторых случаях по тепловым и энергетическим соображениям допустимо также включение других приборов для параллельных наблюдений или калибровок, но, к сожалению, это будет нечасто. Данное ограничение приводит к тому, что при компоновке программы следует отдавать предпочтение применению одного прибора для разных наблюдений. Часто это требование противоречит принципу выбора объектов либо близких между собой, либо расположенных по небу в виде непрерывной последовательности.

Нами подготовлена типовая программа наблюдений КТ, чтобы найти наилучший подход к их планированию. В ней предусматривается распределение времени между всеми научными приборами и астрометрическими наблюдениями с датчиками точного гидирования примерно в ожидаемой пропорции. Мы стремились составить характерную и реалистическую программу и несколько раз пересматривали ее по мере уточнения рабочих характеристик обсерватории. В результате выяснилось, что научные наблюдения, включая калибровки по небесным объектам, займут примерно 40 % времени. Можно увеличить эту долю, если стремиться просто к максимальной загрузке, а не к выполнению определенных программ. Многих астрономов удивляет малое время работы, хотя оно сравнимо с временем работы наземных телескопов. Если учесть, что в среднем ночь длится всего 10 ч, а в лучших обсерваториях из-за погоды используется не более 75 % времени, то загрузка телескопа составит всего 31 %, не учитывая еще дополнительных ограничений программы из-за фаз Луны и т. д.

7.3. Управление спутником

КТ будет управляться из Центра космических полетов им. Годдарда, отвечающего за работу всех непилотируемых околоземных спутников. Центр поддерживает связь со спутником через спутниковую систему слежения и ретрансляции, взаимодействует с Научным институтом по прямым каналам связи и с его представителями (рис. 26). После запуска КТ переходит в ведение центра управления полетом. Разработчики обсерватории и научных приборов сообщают, как именно должна работать система, и помогают в устранении неполадок.

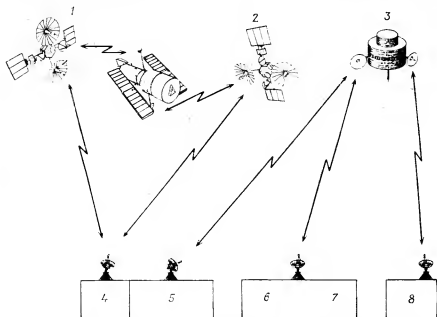
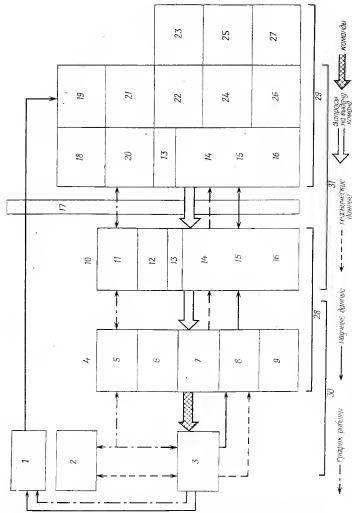


Рис. 26. В состав системы обмена информацией с КТ входят несколько наземных станций и спутников, обеспечивая управление обсерваторией и передачу части научных данных почти в реальном времени. 1 — западный спутник слежения и ретрансляции; 2 — восточный спутник слежения и ретрансляции; 3 — спутник связи DOMSAT; 4 — наземная станция спутниковой системы слежения и ретрансляции; 5 — антенна системы дальней космической связи НАСА и система записи (4, 5 — полигон Уайт-Сэндз в Нью-Мексико); 6 — центр управления КТ; 7 — система сбора научных данных (6, 7 — Центр космических полетов им. Годдарда, шт. Мэриленд); 8 — Научный институт КТ (Университет им. Джона Хопкинса, шт. Мэриленд).

Сложность такой организации ясна из рис. 27, где схематически показана передача команд и телеметрических данных.

Первый период работы спутника будет испытательным, когда проверяются различные части системы. Потом начнутся наблюдения. Первыми наблюдателями будут участники проектирования и изготовления телескопа, в течение двух месяцев он предоставляется в их полное распоряжение. Далее доля выделенного им наблюдательного времени уменьшается до 50% в течение 6 мес, потом до 25% в течение 12 мес, затем до 10% в течение 10 мес, после чего наблюдательное время не резервируется. В течение этого периода ученые стран — членов ЕСА получают не менее 15% времени в награду за участие ЕСА в программе. Остальное наблюдательное время выделяется приглашенным исследователям, отбор которых начнется за год до запуска.

Рис. 27. Схема наземной системы, обеспечивающей работу КТ. 1 — система сбора научных данных; 2 — вычислительный комплекс центра управления; 3 — система дальней космической связи НАСА и вычислительный центр; 4 — группа управления КТ; 5 — составление программы полета КТ; 6 — выработка команд управления; 7 — система выдачи команд на спутник; 8 — система приема телеметрических данных; запись телеметрических данных; 10 — Центр космических исследований; 11 — планирование научной работы и вытекающих отсюда требований к полету; 12 — интерфейс системы обмена информацией; 13 — выявление сбоев; 14 — оценка качества научной информации; 15 — система наведения на объект; 16 — оценка состояния научной аппаратуры; 17 — система дальней космической связи НАСА; 18 — калибровка; 19 — прием научной информации; 20 — планирование научных исследований; 21 — переработка научной информации; 22 — хранение информации; 23 — научный анализ данных; 24 — система первичной обработки данных; 25 — система выбора гидировочных звезд; 26 — окончательная научная информация; 27 — научное руководство программой КТ (Научный институт, группа управления Центра космических исследований); 28 — центр управления полетом КТ; 29 — Научный институт КТ; 30 — наземный комплекс управления КТ; 31 — наземный комплекс управления.



По мере необходимости будут производиться техническое обслуживание и доработка КТ. Предполагается, что первое посещение на орбите состоится через 2,5 г. после запуска, а после 5 лет работы в космосе весь спутник будет на год возвращен на Землю для доработки. После второго запуска весь цикл повторится. На КТ имеется много резервных систем, которые могут продлить период работы между посещениями. Однако непрерывные попытки сократить стоимость программы привели к снижению надежности, и это вносит в перспективное планирование заметную неопределенность.

8. Выбор научных задач для КТ

Целью программы КТ являются научные исследования, а не просто разработка обсерватории и системы управления. В этом последнем разделе мы рассмотрим научные проблемы. Будут описаны процедуры выявления научных задач и считающихся в настоящее время наиболее важными направлений исследований.

Процесс выбора наблюдателей может быть описан уже сейчас, потому что он будет очень похож на исходный метод отбора ученых для участия в программе, ибо общие принципы были выработаны на раннем этапе. В циркулярном письме об участии ученых в разработке тех, кто подает предложения, просили описать, как бы они пользовались КТ. Научный уровень предлагаемых исследований играл решающую роль при отборе. Формулируя свои предложения в мае 1977 г., ученые имели в виду конкретные программы наблюдений. Они основывались на некоторых предполагаемых свойствах КТ и на том, что было и чего не было тогда известно в науке. Характер обсерватории немного изменился в процессе проектирования, а научные приборы теперь вполне определены и гораздо более универсальны, чем предполагалось в период издания первого циркулярного письма. Наши представления об астрономических задачах успели заметно измениться с 1977 г. и еще сильнее изменятся до запуска КТ в конце 1984 г. Для планирования программы наблюдений ученых, участвовавших в разработке и изготовлении (фаза C/D), за год до запуска от них потребуют окончательных предложений. Предполагается, что они будут соответствовать первоначально отобранному предложению; например, ученый, выбранный ранее для исследования планет, не может использовать гарантированное ему наблюдательное время для изучения скоплений галактик. Затем Научный институт составит основные программы, осуществляемые специалистами-разработчиками, и объявит о сборе предложений по использованию оставшегося времени. Уже утвержденные работы не могут пре-

тендовать на это дополнительное время, но для заполнения программы наблюдений КТ имеется достаточно много других задач.

Выбор будет делать Научный институт с учетом общих рекомендаций, подготовленных в НАСА. Они, по всей видимости, будут всячески способствовать наибольшей научной отдаче КТ, но иногда упор будет делаться на работах, связанных с деятельностью НАСА. Подходящим примером этого станут наблюдения кометы, к которой НАСА запускает зонд, или планеты, к которой приближается космический аппарат. Гораздо труднее будет, вероятно, сделать выбор из слишком большого числа хороших предложений по решению множества будущих естественнонаучных проблем. Решать здесь будет политика Научного института.

Научный институт будет выбирать наблюдателей двух категорий: общих наблюдателей и пользователей данными. Общим наблюдателям предстоит выполнять конкретные программы и сотрудничать в этом с Научным институтом. Пользователь данными получит прокалиброванные результаты наблюдений из фондов Научного института. Некоторая их часть будет представлять собой свежие результаты, полученные сотрудниками института в ходе параллельных наблюдений или в свободное от других задач время. Остальные результаты будут предоставлены в распоряжение любого имеющего на это право ученого через год после того, как они переданы исходному наблюдателю. ЕСА уже приступило к организации Европейского научного центра КТ с целью использования в странах — членах ЕСА открытой научной информации.

Гораздо сложнее описать характер научных программ, которые будут выполняться с 1985 по 2000 г. — в предполагаемый период работы КТ. Нет оснований надеяться, что сейчас это может быть сделано точнее, чем предсказывать в 1935 г. применение 200-дюймового телескопа на горе Паломар. Первой такой попыткой была совокупность предложений, одобренных на этапе разработки. Их не опубликовали, потому что было ясно, что в своем первоначальном виде они никогда не будут реализованы. Пересмотренные варианты этих предложений будут включены в объявление о приглашении наблюдателей, которое появится перед первым запуском. Современные идеи об использовании КТ содержатся в трудах двух конференций. В феврале 1979 г. ЕСА организовало заседание Рабочей группы для обмена идеями о наилучшем и наиболее практичном применении КТ, в которой участвовали преимущественно (но не исключительно) европейцы [5]. В Принстонском университете прошел в августе 1979 г. colloquium Международного астрономического союза по научным исследованиям с помощью КТ [3].

Поступившие предложения, материалы Рабочей группы и коллоквиума неопровержимо свидетельствуют об одном: потребности намного превысят имеющееся наблюдательное время. Поэтому очевидно, что КТ следует использовать только для уникальных задач, то есть таких, которые можно надеяться решить только с его помощью. Проблемы должны быть не просто важными и актуальными, но и недоступными для исследования другими существующими методами наблюдений. Это будут проблемы, для решения которых существенно используются три главных преимущества КТ: спокойные изображения, в 10 раз меньшие, чем получаемые на Земле; способность регистрировать источники, в 50 раз более слабые, чем на крупных наземных телескопах, и широкий непрерывный диапазон длин волн.

КТ будет наиболее мощной среди всех оптических обсерваторий. Он потребует много от строящих его инженеров и ученых и еще больше от наблюдателей, кое-кто из которых сейчас еще учится в начальной школе. Есть все основания надеяться, что он коренным образом изменит наши представления о Вселенной.

Литература

1. Danielson R. E., Tomasko M. G., Savage B. D. *Astrophys. J.*, 178, 887, 1972.
2. Leckrone D. S. *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 92, 5, 1980.
3. Longhair M. C., Warner J. W. *Scientific Research with the Space Telescope*. NASA SP-2111, 1979.
4. Macchetto F. D. et al. *The Faint Object Camera for the Space Telescope*. ESA SP-1028, Oct. 1980.
5. Macchetto F. D., Pacini F., Tarenghi M. *Astronomical Uses of the Space Telescope*. ESA, Feb. 1979.
6. Meinel A. *Telescopes*, ed. G. P. Kuiper, B. M. Middlehurst, Univ. Chicago Press, 1960, p. 25 [Имеется русский перевод: *Телескопы*, Под ред. Дж. Койпера и Б. Миддлахерст.— М.: ИЛ, 1963, с. 42].
7. A Review of Space Research. *Publ.* 1079, Cap. 2, Astronomy. National Academy of Sciences, National Research Council, 1962.
8. Space Research: Directions for the Future. *Publ.* 1403, Part 2, Astronomy and Astrophysics. National Academy of Sciences, National Research Council, 1966.
9. Scientific Uses of Large Space Telescope. *Space Sci. Board, National Academy of Sciences, National Research Council*, 1969.
10. Astronomy and Astrophysics for the 1970's. *Astron. Survey Committee, National Academy of Sciences, National Research Council*, 1972.
11. The Scientific Results from the Orbiting Astronomical Observatory (OAO—2). NASA SP-310, 1972.
12. Oberth H. *Die Rakete zu den Planetenräumen*. Munich R. Oldenbourg., 1923.
13. Spitzer L. *Astronomical Advantages of an Extra-Terrestrial Observatory*. Project RAND Report. Douglas Aircraft Co., Sept. 1, 1946.
14. Spitzer L. *Scientific Uses of the Large Space Telescope*. *Publ. of the National Academy of Sciences*, Washington, DC, 1968.
15. Spitzer L. *Quat. J. of Roy. Astron. Soc.*, 20, 29, 1979.
16. Spitzer L., Jenkins E. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 13, 133, 1975.

ОБСЕРВАТОРИЯ им. ЭЙНШТЕЙНА И БУДУЩЕЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ

*Р. Джаакони, П. Горенштейн, С. Мюррей, И. Шрейер,
Ф. Сьюард, Х. Таненбаум, У. Таккер, Л. Ван Спейбрук¹*

1. Введение

При изложении событий, которые привели к созданию и выводу на орбиту обсерватории им. Эйнштейна, следовало бы придерживаться по крайней мере трех направлений. Такой рассказ



Рис. 1. Общий вид обсерватории им. Эйнштейна (с согласия фирмы TRW).

¹ Harvard/Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, Massachusetts 02138.

по необходимости должен включать в себя характеристику достигнутого технологического прогресса, хронику борьбы с целью убедить научную общественность и финансирующие организации в необходимости осуществления такого проекта и, наконец, описание проблем, возникших во время реализации проекта, решение которых в конечном счете определило характеристики обсерватории, выведенной на орбиту (рис. 1).

Важная особенность обсерватории им. Эйнштейна состоит в применении оптики косого падения (см. разд. 1.1). Внедрение оптики косого падения во внесолнечную рентгеновскую астрономию проходило далеко не гладко, в то время как исследования излучений высоких энергий в целом и солнечная рентгеновская астрономия в частности получили значительную поддержку со стороны Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (НАСА). Внимание, проявленное НАСА к программам создания малого астрономического спутника (SAS-1, или «Ухуру», SAS-2, SAS-3), орбитальной солнечной обсерватории, платформы ATM на орбитальной станции «Скайлэб» и позже обсерватории астрофизики высоких энергий (HEAO), дало американским специалистам возможность выйти на передний край исследований в рентгеновской астрономии. Помехи, подобные возникшим при создании рентгеновских телескопов, по-видимому, встречаются при внедрении любой новой технологии, в особенности в том случае, когда это внедрение приводит к существенным переменам социологического характера. Вывод на орбиту обсерватории им. Эйнштейна ознаменовал собой начало радикальных изменений в методах рентгеновской астрономии, изменений, связанных с переходом от отдельных экспериментов к совместному использованию крупных исследовательских установок. Мы надеемся, что информация, содержащаяся в этой статье, окажется полезной при разработке и введении в действие новых рентгеновских телескопов 80-х годов.

1.1. Развитие технологии

При фокусировании рентгеновских лучей в телескопах косого падения используется то обстоятельство, что при падении на поверхность под достаточно малым (косым) углом эти лучи ведут себя подобно обычным световым. Значительные преимущества, связанные с применением оптики косого падения во внесолнечной рентгеновской астрономии, стали очевидными уже к началу 60-х годов. Впервые на эти преимущества было указано в статье Джакокони и Росси [29], подчеркивающих большую эффективную площадь, собирающую излучение, высокое угловое разрешение и высокое отношение сигнала к шуму, которые

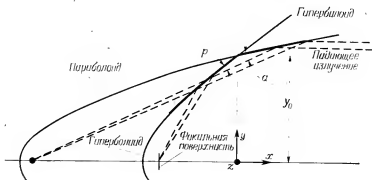


Рис. 2. Ход лучей в принципиальной оптической схеме, лежащей в основе конструкции рентгеновского телескопа.

могут быть достигнуты при использовании параболоидных коллекторов косого падения. В этой работе отмечалась также возможность дальнейшего развития указанного метода с целью получения изображений, подобно тому как это было предложено Уолтером [66] для микроскопов.

Оптика косого падения привлекала внимание конструкторов рентгеновских микроскопов в течение нескольких десятилетий [39]. В основу всех разработанных схем был положен эффект, исследованный в 1922 г. Комптоном [16]. Он состоит в том, что полированная поверхность может отражать рентгеновские лучи с высокой эффективностью (около 50 %), если угол скольжения падающего излучения по отношению к этой поверхности достаточно мал ($\theta \lesssim 1^\circ$ при $\lambda > 10 \text{ \AA}$). Из различных конструктивных схем наиболее привлекательными для применения на телескопах выглядели схемы Уолтера, позволяющие достигнуть большой площади, собирающей излучение, и высокого углового разрешения в пределах широкого поля. Однако в этих схемах предполагалось использование двух отражений от поверхностей вращения конических сечений (рис. 2). Из-за отсутствия технологии полировки таких поверхностей, обеспечивающей достижение требуемой точности, ни одна из схем Уолтера не была реализована на практике. Требования в отношении точности поверхности определяются тем, что для предотвращения рассеяния, сильно снижающего эффективность отражения и разрешение, отклонения от заданной формы не должны превышать нескольких ангстрем. Джаккони и Росси предположили, что значительно большие размеры элементов оптики, используемых в телескопах, могут облегчить достижение требуемой точности.

Джиаккони и его сотрудники из фирмы «Американ сайенс энд энжиниринг» начали под эгидой НАСА (контракт NAS5-660) программу экспериментальных исследований. Эти исследования в июле 1961 г. привели к созданию рентгеновского коллектора с эффективной площадью около 1 см^2 и углом скольжения 2° , представляющего собой стеклянный конус с полированной внутренней поверхностью (ASE-142). Позже, в январе 1963 г., был сконструирован телескоп-аппарат для мягкого рентгеновского излучения [26] с эффективной площадью 2 см^2 , угловым разрешением $1'$ на поле зрения $40'$, фокусным расстоянием 64 см и эффективностью 5% при $\lambda = 44 \text{ \AA}$. Основным элементом телескопа представлял собой алюминиевую трубу с механически обработанной и отполированной внутренней поверхностью. Покрытие поверхности осуществлялось путем осаждения паров золота. Хотя достигнутая эффективность была еще очень далека от теоретического предела, положительные результаты демонстрации этих опытных образцов, изготовленных в условиях лаборатории, вселяли надежду на успех.

Уже в то время стало ясно, что телескопы косого падения найдут себе широкое применение для рентгеновских исследований небесных объектов, в частности Солнца, поскольку по чувствительности они в 100 раз превосходили использовавшиеся тогда рентгеновские узкодифракционные камеры.

Описанная выше программа экспериментальных исследований потребовала лишь весьма скромных затрат. Финансовые ограничения не позволяли заняться ни созданием телескопов с полированными оптическими поверхностями, ни исследованием проблемы значительного улучшения качества поверхностей. Хотя были разработаны некоторые новые методы производства элементов рентгеновской оптики, например изготовление реплик полированных зеркал с применением эпоксидов и электролитического осаждения, главная цель указанной программы состояла в создании действующих прототипов инструментов, предназначенных для использования в условиях космоса. Дальнейшего прогресса можно было достичь лишь после включения этих работ в план космических исследований НАСА, на которые, как правило, выделяется значительно больше средств, чем на обычные лабораторные программы.

1.2. Использование рентгеновских телескопов в солнечной астрономии

Рентгеновское излучение Солнца интенсивно изучалось Г. Фридманом и его сотрудниками из Морской исследовательской лаборатории США начиная с 1948 г. Они показали, что источники рентгеновского излучения нередко имеют локальный

характер и сравнительно небольшие угловые размеры [8]. Однако узкодифракционная камера при разрешении $1'$ едва позволяла получить лишь одно изображение за все время ракетного эксперимента. Детали гораздо меньшего углового размера могли быть обнаружены только при использовании телескопа косоугольного падения с фотографической регистрацией изображения, предложенного группой из фирмы «Американ сайенс энд энжиниринг».

Дж. Линдсей из Центра космических полетов им. Годдарда занимался исследованиями Солнца в течение многих лет, вначале в Морской исследовательской лаборатории, а затем в НАСА. Он положил начало мероприятиям по созданию спутников серии OSO и был техническим руководителем контракта НАСА, позволившего группе из «Американ сайенс энд энжиниринг» начать разработку рентгеновских телескопов. Его личная заинтересованность и горячая приверженность делу использования рентгеновских телескопов для изучения Солнца в незначительной степени содействовали включению этих исследований в программу НАСА.

Джаккони и Хармон из фирмы «Американ сайенс энд энжиниринг» по контракту с НАСА (NAS5-3569) приступили к разработке аппаратуры, предназначенной для размещения на орбитальной солнечной обсерватории (OSO—D) [2, 3]. Одновременно началось выполнение программы совместных работ фирмы «Американ сайенс энд энжиниринг» и Центра космических полетов им. Годдарда. Результатом этой программы стало получение 15 октября 1963 г. и 17 марта 1965 г. первых рентгеновских снимков небесного объекта (Солнца) с помощью телескопов косоугольного падения, установленных на ракетах [28]. Эти телескопы с никелевыми зеркалами имели диаметр 7,6 см, фокусное расстояние 83,6 см, площадь $1,6 \text{ см}^2$. Эффективность телескопа на $\lambda = 8 \text{ \AA}$ составляла 15 %, а угловое разрешение было лучше $1'$.

Еще более важный эксперимент планировался группой Линдсей—Джаккони в рамках программы создания модифицированного космического аппарата серии OSO и позже платформы АТМ [44, 4]. В 1964 г. началась разработка телескопа с диаметром 26 см, фокусным расстоянием 200 см и площадью, собирающей излучение, равной 38 см^2 . Однако в 1965 г. выполнение указанной программы было прекращено и НАСА перешло к подготовке экспериментов по исследованию Солнца на борту космического корабля, управляемого человеком. В сентябре 1965 г. Дж. Линдсей скончался и сотрудничество фирмы «Американ сайенс энд энжиниринг» с Центром космических полетов им. Годдарда прекратилось. Однако начатая работа нашла свое продолжение в двух экспериментах, S-054 (Джаккони и др.)

и S-056 (Андервуд и др., НАСА — Центр космических полетов им. Годдарда), осуществленных при полете платформы АТМ в 1973 г.

К этому времени развитие рентгеновской оптики позволило получить с помощью телескопов, установленных на ракетах, изображения Солнца с разрешением $20''$ [58, 59], а система, разработанная группой специалистов из «Америкен сайенс энд энжиниринг» для платформы АТМ (рис. 3), давала разрешение $5''$ при диаметре зеркал 31 см и фокусном расстоянии 213 см. (Краткий обзор, посвященный раннему этапу развития астрономической рентгеновской оптики, приведен в статье [27].) Трудно переоценить роль, которую сыграли в этих достижениях энтузиазм Дж. Линдсея и поддержка Х. Глейзера из отдела солнечной физики НАСА.

1.3. Использование рентгеновских телескопов во внесолнечной астрономии

В противоположность быстрому проникновению телескопов косого падения в эксперименты по солнечной физике во внесолнечной астрономии внедрение этих инструментов происходило довольно медленно. Предложение по разработке небольшого (площадь 10 см) телескопа, предназначенного для изучения небесных рентгеновских источников с ракет, представленное в НАСА в 1961 г., было отклонено, как и проект более крупного (диаметром до 1,2 м) телескопа, устанавливаемого на спутнике (1963 г.).

По-видимому, успешное применение обычных методов, использующих пропорциональные счетчики с механической коллимацией, которое привело к открытию рентгеновских звезд неожиданно высокой светимости [27], а также богатые научные результаты, полученные в начале 60-х годов при наблюдениях такими методами с ракет, несколько задержали внедрение телескопов в исследования внесолнечных рентгеновских источников. При наблюдениях со спутников, таких, как «Ухуру» и еще более крупных (предлагавшихся, например, Г. Фридманом), чувствительность указанных методов могла быть существенно повышена.

К тому же оставались нерешенными некоторые существенные технические проблемы. Во-первых, телескопы косого падения, использовавшиеся в солнечной астрономии, были мало приспособлены для наблюдений звезд. Это определялось тем обстоятельством, что поверхностям зеркал косого падения свойственны два вида дефектов: отклонения от заданной общей формы (ошибка наклона) и микронеровности поверхности. Первая из этих ошибок определяет полуширину функции рассеяния точки

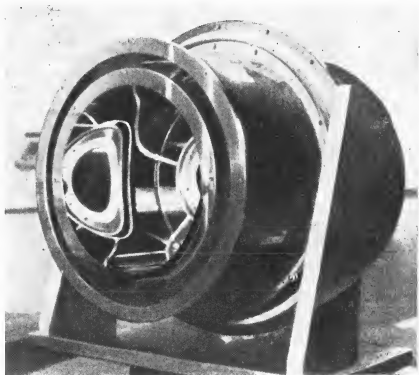


Рис. 3. Система коаксиальных зеркал, использовавшаяся в эксперименте S-054 по изучению солнечного рентгеновского излучения на орбитальной платформе АТМ. Зеркала сделаны из бериллия; отражающие поверхности покрыты канигеном.

и, следовательно, предельно достижимое угловое разрешение; вторая определяет величину потерь на рассеяние, т. е. долю энергии падающего излучения, приходящуюся на разрешаемый элемент. При больших значениях падающего потока, характерных для солнечных наблюдений, потери на рассеяние не играют существенной роли, поскольку отраженный поток достаточно велик и позволяет получить изображение с высоким разрешением. Однако при исследовании внесолнечных источников, когда значения потока в миллионы раз меньше, чем при наблюдениях Солнца, эффективность сбора фотонов приобретает решающее значение. Для повышения этой эффективности характерные размеры микронеровностей должны быть снижены от типичных значений 50—100 до 30 Å и меньше, что и было достигнуто при изготовлении оптики обсерватории им. Эйнштейна. Для увели-

чения площади, собирающей излучение, необходимо разработать соответствующую конфигурацию системы зеркал и решить сопутствующую проблему их юстировки. Наконец, при установке инструмента на спутниках, таких, как ОАО, для регистрации изображения нельзя использовать фотопленку, и возникает проблема создания рентгеновской камеры высокого разрешения, способной регистрировать единичные фотоны.

Недостаточная поддержка лабораторных разработок, касающихся телескопов косоугольного падения для исследований звезд, означала, что такие разработки могли осуществляться лишь на не вполне законных основаниях в рамках программы создания солнечных телескопов. Действительно, в эксперименте S-054 на платформе АТМ использовалась двухзеркальная система рентгеновской оптики, по сути дела не так уже необходимая. Кроме того, была сконструирована рентгеновская телевизионная камера первого поколения, хотя для регистрации изображения применялась фотопленка. Первые рентгеновские телескопы с зеркалами оптического качества из плавленого кварца также были изготовлены в рамках программы исследований Солнца [45].

Негативное отношение к использованию фокусирующей рентгеновской оптики со стороны астрономического сообщества представляло собой еще более серьезную помеху для развития этого метода. Большинство членов научного совета в то время подчеркивали необходимость завершить обзор всего неба с помощью обычных приемников, а уже потом переходить к использованию рентгеновской оптики с высоким разрешением. Некоторые астрофизики-теоретики утверждали даже, что нет и не будет никаких оснований для применения телескопов с высоким разрешением в рентгеновской астрономии, поскольку процессы, порождающие рентгеновское излучение, должны проявляться в основном в виде диффузных источников. В середине 60-х годов из всех научных спутников лишь орбитальная астрономическая обсерватория ОАО имела системы наведения, управления и сбора данных, соответствующие требованиям установки рентгеновского телескопа. Однако включение крупного рентгеновского эксперимента в программу ОАО могло бы помешать выполнению наблюдений в ультрафиолетовой области, к которым астрономы готовились с 50-х годов. Поэтому единственным рентгеновским коллектором косоугольного падения на борту ОАО был небольшой инструмент, разработанный Р. Бойдом и другими специалистами из Маллардской исследовательской лаборатории (Англия) [11]. Поскольку этот коллектор имел площадь зеркала всего около 10 см^2 и не был рассчитан на построение изображений, по чувствительности он не превосходил обычные рентгеновские детекторы, установленные на борту спутника в 1972 г.

Летняя школа в Вудз-Холе, организованная Советом по космическим исследованиям Национальной академии наук США в июне—июле 1965 г., предоставила первую возможность детально обсудить значительные преимущества использования фокусирующей оптики во внесолнечной рентгеновской астрономии. В состав комиссии по рентгеновской и гамма-астрономии входили Г. Фридман (председатель), Дж. Кларк, П. Фишер, П. Джаккони, В. Краусхаар, Р. Новик, Б. Росси и др.

Открытая дискуссия впервые позволила констатировать, что дальнейшее повышение чувствительности обычных детекторов ограничивается такими факторами, как фоновый шум и путаница источников. Среди основных выводов в сообщении комиссии отмечалось, что телескопы косого падения «по-видимому, представляют собой единственный тип инструментов, пригодных для более тонких наблюдений, которые будут необходимыми по завершении ранней стадии исследований».

Высокое угловое разрешение оптики, строящей изображения, чувствительность, позволяющая регистрировать очень слабые источники, возможность использования телескопов в сочетании с поляриметрами и дисперсионными спектрометрами — все эти достоинства получили, наконец, признание. Комиссия вынесла рекомендацию, согласно которой «в самое ближайшее время следует начать осуществление программы рентгеновских исследований, основанной на применении телескопов косого падения, и развивать ее до полной реализации потенциальных возможностей метода». Кроме того, комиссия рекомендовала вывести на орбиту спутник серии ОАО, специально оборудованный для исследований в области рентгеновской астрономии [51].

Во время этой встречи специалисты в области физики космических лучей, астрономы, заинтересованные в применении рентгеновских детекторов чрезвычайно большой площади, и сторонники широкого использования рентгеновских телескопов пришли к общему мнению о необходимости вывода на орбиту большого, но недорогого спутника («Супер-Эксплорер»), способного удовлетворить всем их требованиям. В частности, было отмечено, что рентгеновские телескопы требуют лишь весьма умеренной (порядка $1'$) точности наведения, поскольку число регистрируемых фотонов невелико и восстановление изображения можно производить с высокой точностью (около $1''$) в наземных условиях. Таким образом, возникла идея о разработке целой серии одинаковых и сравнительно недорогих астрономических спутников, предназначенных для выполнения обзоров и наблюдений, требующих грубого наведения. Эта идея позже была реализована при создании спутников серии НЕАО.

В июне 1967 г. Джаккони обратился к заместителю директора НАСА по научным и прикладным космическим исследова-

ниям Г. Ньюэллу с письмом, содержание которого стало широко известно в НАСА. В этом письме Джиакокки обосновал необходимость вывода на орбиту спутника серии ОАО с небольшим рентгеновским телескопом (диаметр 30 см, фокусное расстояние 300 см) и последующей реализации более крупного проекта телескопа (с диаметром 1 м и фокусным расстоянием 10 м) в 70-х годах. Согласно его предложению, первый из этих телескопов должен считаться экспериментальным и находиться в ведении одного ведущего исследователя. Более крупный телескоп Джиакокки рекомендовал рассматривать как установку для совместной реализации нескольких экспериментов. Он предложил в качестве головной группу из «Американ сайенс энд энжиниринг», которая должна была играть роль ведущего исследователя, обеспечивать разработку оптики и рентгеновской камеры, а также интегрирование в комплекс других приборов, таких, как спектрометры и поляриметры.

В своем ответе на письмо Ньюэлл в августе 1967 г. выразил интерес к проекту меньшего телескопа, подходящего для наблюдений с платформы АТМ, однако подчеркнул намерение НАСА рассматривать даже этот небольшой инструмент в качестве наблюдательной установки, а не отдельного эксперимента. По его распоряжению 9—10 октября 1967 г. было созвано совещание под председательством Н. Роман, в котором приняли участие многие из американских специалистов в области рентгеновской астрономии. В резолюции отмечалось, что «большой фокусирующий рентгеновский телескоп косоуго падения необходим для реализации будущих программ астрономических исследований, касающихся излучений высоких энергий».

Поскольку несколько групп специалистов заявили о своем намерении участвовать в таком проекте, а комиссия по астрономическим программам недвусмысленно рекомендовала его выполнение [50], НАСА 16 февраля 1968 г. распространило оповещение о начале сбора предложений. В нем, в частности, говорилось: «В настоящее время НАСА планирует использование параболического фокусирующего телескопа для рентгеновских исследований. Этот инструмент следует рассматривать как наблюдательную установку, а не как экспериментальный образец. Принимаются предложения по экспериментам, выполняемым в фокусе этого инструмента наряду со всей необходимой вспомогательной аппаратурой, исключая предложения, касающиеся основного телескопа».

В итоге несколько групп специалистов, включая группы Джиакокки из «Американ сайенс энд энжиниринг», Дж. Кларка из Массачусетского технологического института, Р. Новика из Колумбийского университета и И. Болдта из Центра космических полетов им. Годдарда, были выбраны в качестве возмож-

ных разработчиков и Центр космических полетов им. Маршалла начал с их помощью определять конкретную программу будущих исследований.

Первое совещание с астрономами, интересовавшимися этой программой, состоялось 19 марта 1969 г. в Центре космических полетов им. Маршалла под председательством Э. Стулингера, заместителя директора центра по науке. За ним последовала целая серия таких встреч специалистов, в результате которых стало очевидным, что фокусирующая рентгеновская оптика еще не приобрела статуса обычного инструмента научных исследований. По этой причине не представлялось возможным установить четкие параметры будущей обсерватории без дополнительной информации о намечаемых экспериментах. Учитывая это, специалисты из различных ведомств, участвующих в разработке программы, решили провести ряд совещаний в своих собственных организациях, чтобы определить научные цели программы, эксперименты, необходимые для достижения этих целей, и, наконец, требуемые проектные характеристики телескопа. Итоги этих совещаний были представлены НАСА 1 августа 1969 г. в виде документа, озаглавленного «Телескопы и научная аппаратура для астрономической обсерватории высоких энергий — результаты предварительного анализа».

В этом сообщении содержалось описание проекта научного комплекса, включающего два рентгеновских телескопа, один из которых отличался низким разрешением (10"), высоким энергетическим выходом и большой площадью (5000 см²), а другой — высоким разрешением (2"), более низким энергетическим выходом и меньшей площадью (1000 см²). Кроме того, в составе комплекса предусматривались инструменты, устанавливаемые в фокальной плоскости, и различные подсистемы, обеспечивающие выполнение сложных астрономических наблюдений в рентгеновской области. В сообщении констатировалось: «Характеристики телескопов и экспериментов связаны так тесно, что, по нашему мнению, допуски на оптику должны устанавливать сами заказчики. Кроме того, заказчики должны иметь право производить технический контроль при изготовлении и испытании приборов». Специалисты вынесли рекомендацию установить научное оборудование на разрабатываемом НАСА аппарате серии «Супер-Эксплорер», выводимом на орбиту ракетой «Титан III-C».

После выполнения предварительного анализа специалисты из указанных четырех организаций приняли решение, что для обеспечения конструктивной цельности проекта они обратятся в НАСА с совместным предложением, выступая как единый консорциум с одним ведущим исследователем. Соглашение между этими организациями, в котором были сформулированы

основные принципы составления заявок, разработки экспериментов, определения целей программы, контроля за состоянием аппаратуры, получения и использования научных данных, подписали от имени соответствующих организаций Болдт, Кларк, Джаккони, Гурски и Новик 27 января 1970 г. Выбор одного ведущего исследователя, одобренный организационным научным комитетом, должен был обеспечить компетентное и авторитетное научное руководство, необходимое для успешного выполнения проекта.

1.4. Программа НЕАО

В ответ на извещение НАСА от 3 марта 1970 г. четыре организации (фирма «Американ сайенс энд энжиниринг», Колумбийский университет, Центр космических полетов им. Годдарда и Массачусетский технологический институт) в мае 1970 г. внесли предложение о создании большого орбитального рентгеновского телескопа. Джаккони был назначен ведущим исследователем. Несмотря на проблемы, возникающие в НАСА в связи с тем, что ответственность за все сложное и дорогое научное оборудование спутника возлагалась на одного ведущего исследователя, внесенное предложение в октябре 1970 г. получило положительный отзыв руководства НАСА. В результате большой рентгеновский телескоп было намечено вывести на орбиту на третьем из четырех спутников серии НЕАО.

С самого начала обсерватория проектировалась как единая общенациональная научная установка, разрабатываемая и управляемая консорциумом из четырех организаций по поручению НАСА и доступная для всех астрономов. Организации — участники проекта выразили свое намерение отказаться от исключительных прав ведущего исследователя на использование полученных данных в течение одного года и предложили выделять наблюдательное время для приглашенных наблюдателей сразу же после начала функционирования обсерватории.

Работа над проектом началась в 1971 г. Руководителем программы НЕАО был назначен Ф. Спир из Центра космических полетов им. Маршалла. Особое внимание уделялось таким наиболее важным элементам научного оборудования, как зеркало системы высокого разрешения (диаметр 1,2 м) и рентгеновские камеры. Однако в январе 1973 г. в программу НЕАО были внесены значительные изменения. Поскольку стоимость этой программы, предусматривающей вывод на орбиту четырех спутников, возросла до 450 млн. долл. и возникли другие бюджетные затруднения, НАСА пришлось урезать бюджет программы наполовину. Это означало сокращение числа запускаемых спутников от четырех до трех и уменьшение оснащенности каждого

спутника. После серии совещаний в НАСА проект большого орбитального комплекса для рентгеновских наблюдений также был существенно пересмотрен. Пришлось отказаться от телескопа низкого разрешения площадью 5000 см², а телескоп высокого разрешения стал гораздо меньше (диаметр был снижен от 1,2 до 0,6 м, а фокусное расстояние — от 6 до 3,5 м). Единственное утешение состояло в том, что в пересмотренной программе вывод телескопа на орбиту предусматривался во время второго запуска, а не третьего, как планировалось раньше.

Повторное обсуждение программы в управлении космических исследований состоялось 13—14 сентября 1973 г. В предложении, которое выдвинул консорциум, включающий Гарвардско-Смитсоновский астрофизический центр (куда перешли из фирмы «Америкен сайенс энд энжиниринг» Джаккони и его группа), Колумбийский университет, Центр космических полетов им. Годдарда и Массачусетский технологический институт, описывался проект новой обсерватории НЕАО—В. Его обоснованность была подвергнута переоценке с учетом новых данных рентгеновской астрономии, в частности открытий, сделанных с помощью спутника «Ухуру». Подтверждалась роль обсерватории как научной установки общенационального значения с широким доступом для наблюдателей со стороны. Технические усовершенствования, достигнутые за истекшее время, в первую очередь разработка технологии полировки зеркал с очень высокой точностью, позволили частично компенсировать уменьшение площади и считать, что основные научные задачи, сформулированные в прежнем проекте, могут быть решены и обсерваторией НЕАО—В за счет увеличения времени наблюдений.

Наиболее серьезным ограничением, введенным в пересмотренной программе, было фиксирование времени функционирования для всех трех спутников серии НЕАО. Такая мера была необычной для НАСА, поскольку большинство космических аппаратов, рассчитанных на определенное минимальное время жизни, обычно и по его истечении продолжали функционировать до отказа, если давали ценную научную информацию. Например, спутник «Ухуру» был рассчитан на время жизни шесть месяцев, а в действительности функционировал в течение нескольких лет. Этот новый подход был принят управлением космических исследований НАСА под сильным нажимом со стороны административно-бюджетного управления с целью снизить общую стоимость программы путем ограничения затрат на анализ данных и поддержание функционирования космического аппарата по истечении установленного срока. Большинство специалистов, принимавших участие в программе, были убеждены, что такой подход в конце концов будет отвергнут.

Вслед за этим начался продолжавшийся пять лет период

борьбы за сохранение максимума научного содержания программы в условиях ограничения материальных ресурсов и увеличения стоимости разработок вследствие инфляции и перерасходов. Нам пришлось согласиться с сокращением комплекта приборов, снижением уровня требований к оптике телескопа и сведением к минимуму стадии испытаний и калибровки. Одной из жертв в этой борьбе стал предлагавшийся группой из Колумбийского университета поляриметр, который был исключен из комплекта аппаратуры при пересмотре программы. Такая же участь постигла зеркало высокой эффективности и устройство для контроля за яркостью неба, запланированные Центром космических полетов им. Годдарда.

В течение 1973—1975 гг. программа претерпела существенные сокращения. Поставка единственного зеркала, предназначенного для контроля рентгеновской оптики в процессе изготовления, была вначале отложена, а затем и вовсе отменена, так что рентгеновский контроль оптики не производился вплоть до заключительной стадии калибровки системы. Двухкамерный панорамный пропорциональный счетчик стал однокамерным, причем в нем вместо ранее предусмотренного был применен газ $\text{Ag}-\text{CO}_2$. Цель нововведения состояла в том, чтобы можно было ограничиться использованием одного газового резервуара, общего с кристаллическим спектрометром, установленным в фокальной плоскости. Такая модификация привела в последующем к бесконечным осложнениям в работе обсерватории. Согласно первоначальному проекту, мониторный пропорциональный счетчик, представляющий собой инструмент с полем зрения 1° , должен состоять из двух детекторов, один из которых направлен соосно с телескопом и регистрирует яркость источника, а другой несколько смещен и измеряет фон. В целях экономии детектор фона был исключен, что значительно снизило научную ценность всего прибора. Замена десятипозиционного набора фильтров двухпозиционным, использующим тот же механизм, что и дифракционный спектрометр, привела к резкому сужению возможностей широкополосной спектроскопии. Во время полета один из двух фильтров вообще отказал, еще более ограничив программу наблюдений.

Кроме того, было сокращено число опытных образцов, запасных частей и другого оборудования. Калибровка, выполнявшаяся на 300-метровой рентгеновской установке в Хантсвилле, продолжалась всего один месяц вместо запланированных шести. Это сокращение отведенного времени в какой-то мере было компенсировано напряженным трудом специалистов, участвовавших в программе НЕАО—В, которые в течение этого месяца работали посменно почти круглосуточно.

Разумеется, один из наиболее важных вопросов состоял

в увеличении запланированного времени функционирования обсерватории от одного года до максимально возможного срока. Специалисты, участвовавшие в программах НЕАО—А и НЕАО—В, неоднократно обращались в НАСА с просьбой отменить указанное ограничение. В письме тогдашнему заместителю директора управления космических исследований Дж. Ногли от 20 июня 1974 г. Джаккони указывал, что «программы НЕАО—А и НЕАО—В нельзя рассматривать как простые эксперименты. Это единственная существующая в настоящее время возможность для проведения важных рентгеновских наблюдений. Эти программы представляют собой уникальное средство, обеспечивающее прогресс страны в астрономических исследованиях. Очевидно, что они могут давать важные результаты по крайней мере в течение нескольких лет». В том же письме Джаккони подчеркивал, что «рентгеновская астрономия заслуживает привлечения всех необходимых ресурсов для создания постоянных рентгеновских обсерваторий в космосе».

Отказ удовлетворить эти просьбы означал, что после прекращения функционирования НЕАО—А и НЕАО—В в конце 1981 г.— начале 1982 г. в космосе не останется ни одного крупного американского рентгеновского телескопа вплоть до вывода на орбиту в конце 80-х годов усовершенствованной установки для рентгеновских астрофизических исследований (AXAF).

Проявив чудеса изобретательности, специалисты, участвующие в управлении спутником НЕАО—В (обсерватория им. Эйнштейна) вместе с инженерами из Центра космических полетов им. Маршалла разработали и осуществили специальную программу оперативного управления обсерваторией. Эта программа сводит к минимуму потребление газа за счет оптимизации времени наблюдений конкретных объектов, отказа от наблюдений объектов, имеющих неблагоприятное расположение на небесной сфере и комбинирования наблюдений. Таким образом нам удалось улучшить положение в отношении потребления газа, продлив срок функционирования обсерватории от первоначально намечавшегося одного года до планируемых (к моменту написания статьи) двух с половиной лет. Тем не менее низкая орбита, ограниченное количество имеющегося газа, а возможно, и недостаточная надежность гироскопов должна привести к прекращению функционирования обсерватории в 1981 г.

1.5. Научные цели исследований на обсерватории им. Эйнштейна

Несмотря на описанные выше серьезные затруднения, с которыми было сопряжено создание обсерватории им. Эйнштейна, она до сих пор является самым мощным инструментом рентге-

новской астрономии. Была достигнута чувствительность для точечных источников 10^{-14} эрг/(см²·с) в диапазоне 1—3 кэВ и зарегистрированы предельные значения потока в 500 раз меньше измеренных ранее и в 10^7 меньше, чем поток от первого вне-солнечного источника Скорпион X-1, открытого в 1961 г. Первоначальные цели, сформулированные в проекте большого орбитального рентгеновского телескопа в 1970 г., были в основном достигнуты обсерваторией им. Эйнштейна, результаты работы которой представлены в данной статье. Упомянутый проект представляет известный исторический интерес, поскольку в нем верно предугаданы многие направления исследований в рентгеновской астрономии, плодотворность которых доказана успешной работой обсерватории им. Эйнштейна.

2. Принципы проектирования обсерватории

Прежде чем взяться за проектирование и разработку обсерватории им. Эйнштейна, необходимо было выработать общие принципы. Они должны включать в себя как формальные планы и утверждения, так и эмпирические методы. Опыт создания обсерватории им. Эйнштейна может служить иллюстрацией трех основных положений, применимых и к будущим программам: выработка единого научного подхода, снижение требований к спутнику до допустимого минимума, когда еще сохраняется гибкость работы, и концепция «терпимых», а не «серьезных» отказов.

2.1. Единый научный подход

Описанное выше решение фирмы «Америкэн сайенс энд энжиниринг», Массачусетского технологического института и Колумбийского университета о совместном предложении по постройке спутника явилось отправным пунктом для выработки единых научных требований к обсерватории им. Эйнштейна. Благодаря сложности задачи, ограниченности опыта в данной области и высоким требованиям к экономии средств унифицированный подход был совершенно необходим для решения множества возникающих проблем и сведения к минимуму отрицательных с научной точки зрения последствий многочисленных решений и компромиссов, принятых по ходу реализации проекта.

Отсутствие одного панорамного приемника, обладающего всеми необходимыми свойствами (высокое пространственное разрешение, большое поле зрения, высокий квантовый выход и хорошее спектральное разрешение), или одного спектрометра (с высоким разрешением по энергии и высокой эффектив-

ностью) означало, что для создания комплекта приборов, позволяющих решать общие наблюдательные задачи, также нужен единый научный подход. Ученые объединившихся учреждений решили, что кроме данных с приборов, разработанных в собственных организациях, они будут пользоваться всеми данными со всех приборов обсерватории.

2.2. Требования к спутнику

По своему общему конструктивному принципу обсерватория им. Эйнштейна напоминает наземные телескопы: зеркало сравнительно жестко скреплено с фокальной плоскостью, куда могут помещаться различные приборы. Эту систему можно навести на интересующий нас объект. Однако само зеркало должно быть совсем другим. Когда задумывали строительство обсерватории, то помимо разработки этого зеркала (см. разд. 3) беспокойство вызывали такие технические вопросы, как необходимая точность наведения и стабилизации и надежность отдельных приборов. В ходе осуществления проекта мы выработали в этих направлениях определенные технические задания. Они были по возможности снижены, но так, чтобы сохранить гибкость в работе обсерватории.

Одно из важных в этом плане решений касалось обработки данных на борту спутника. Благодаря своей энергии рентгеновские фотоны могут регистрироваться по отдельности с малым фоном; к тому же для большинства объектов скорость счета мала, поэтому нередко имеет смысл передавать на Землю характеристики отдельных фотонов вместо того, чтобы накапливать их по разным ячейкам на борту. Мы решили ограничиться на обсерватории только теми приборами, где регистрируются отдельные фотоны, и отказаться от приборов с длительным накоплением в приемнике или в бортовых запоминающих устройствах. Возможность передачи на Землю всех данных для последующей обработки и анализа оказалась особенно ценной, когда примерно через год после запуска мы столкнулись с трудностями при восстановлении изображений с высоким разрешением. Как выяснилось, трудности были вызваны ошибками определения ориентации из-за остаточных магнитных полей. Эффект можно исключить, прокалибровав звездные датчики и зная магнитное поле Земли. Если бы информация обрабатывалась на борту и не поступала в сыром виде на Землю, такая «апостериорная» коррекция была бы невозможна, и ухудшение разрешения на несколько секунд дуги было бы неизбежным.

Мы также выяснили, что можно сильно смягчить требования к точности наведения и стабилизации и вместо величин, примерно соответствующих угловому разрешению телескопа,

ошибки могут составить доли размера полезного поля зрения. Стабилизация будет хорошей, если достаточно малое смещение происходит за время, необходимое для определения ориентации, а не за гораздо большее время полных наблюдений. Каждому фотону сопоставляются координаты на небесной сфере, вычисляемые по его координатам на приемнике излучения и направлению ориентации, измеренному в момент его прихода.

В конечном счете точность наведения должна быть такой, чтобы оптическая ось была под углом до $0,5'$ от заданного направления и сдвигалась не более чем на $1''$ за секунду времени. Поле зрения всех приемников достаточно для учета этих ошибок, а система определения ориентации работает настолько быстро, что такое смещение не ухудшит разрешение. Качество работы реального спутника несколько лучше допусков, но их относительное смягчение было важно для сокращения общих затрат.

Принцип снижения требований к спутнику до наименьшего приемлемого уровня должен играть важную роль в любых проектах, поскольку сводятся к минимуму новые разработки и соответствующие затраты. За это приходится платить усложнением обработки и анализа данных на Земле, но, как мы уже видели, при этом появляется возможность устранить непредвиденные ошибки. Следует все-таки предусматривать достаточную гибкость в работе, чтобы избежать упущений вроде тех, о которых рассказано в разделе об управлении обсерваторией.

2.3. Терпимые отказы

Еще один принцип проектирования обсерватории им. Эйнштейна связан с концепцией «терпимых» отказов. Везде, где только можно, предусмотрено такое резервирование, чтобы один отказ не привел к потере существенной части научного потенциала аппарата. Например, вместо двух звездных датчиков установлены три датчика, ориентированных примерно по оси рентгеновского телескопа, рентгеновская оптика спроектирована с термокомпенсацией на случай отказа системы активного терморегулирования, а в проекте обсерватории предусмотрены дублирующие компоненты.

Ориентация определяется по трем источникам информации. Направление в абсолютных координатах и остаточные отклонения умеренных частот находят по сигналам звездных датчиков. На спутнике есть три датчика с полем зрения $2^\circ \times 2^\circ$, работающих по звездам до 9-й величины; их младший разряд соответствует углу $0,2''$. Поля зрения датчиков взаимно смещены в диагональном направлении, причем один датчик установлен по оси рентгеновского телескопа (ось x), а два других наклонены при-

мерно из $2\sqrt{2}$ градусов. При подобном расположении для объекта в любой части неба можно найти подходящие гидировочные звезды с вероятностью 95 %. Сначала для определения ориентации предполагалось установить только два датчика, а два других более грубых датчика в плоскости yz должны были служить для управления положением спутника. Когда мы поняли, что для этого можно использовать три слегка рассовмещенных звездных датчика в x -направлении, НАСА и фирма TRW (которая занималась проектированием и изготовлением спутника) согласились отказаться от двух yz -датчиков взамен на третий x -датчик. Такое резервирование, как оказалось, было совершенно необходимо, потому что вскоре один звездный датчик вышел из строя.

Измерения на каждом звездном датчике делаются с временем накопления 0,32 с и обладают среднеквадратичной ошибкой 1,5" для звезд 9-й величины. Перед запуском величина систематических ошибок из-за остаточных магнитных полей, неучтенной дисторсии и т. д. оценивалась в 0,75", и ориентация могла бы определяться почти с такой же точностью с привлечением сигналов гироскопов, чтобы практически усреднить несколько отсчетов звездных датчиков. За 10 с ошибки гироскопов не превышают 0,3", поэтому при усреднении, например, в течение 10 с среднеквадратичная ошибка уменьшится до 0,8". На самом деле, как уже сказано, при работе на орбите обнаружили более сильные, чем ожидали, эффекты магнитного поля. Их последующее исправление явилось дополнительным источником систематических ошибок в 1".

Источниками угловых ошибок самых низких частот служат ошибки установки приборов в фокальной плоскости, тепловые деформации и медленные деформации конструкции. Такие погрешности выявляются системой искусственных звезд, показанной схематически на рис. 4. На каждом приборе установлены искусственные звезды, их пучки коллимируются линзой, установленной близ центра зеркала, отражаются уголковым отражателем и образуют изображения в звездных датчиках. По этим сигналам могут быть обнаружены и учтены неправильная установка приборов, гнутие оптической скамьи или смещение оптических осей датчика ориентации. Единственным расстоянием между узлами, которое требуется сохранять с абсолютной точностью, является расстояние между зеркалом и фокальной плоскостью; для этого служит оптическая скамья с малым коэффициентом теплового расширения (из графито-эпоксидного композита), спроектированная и построенная Конверским отделением фирмы «Дженерал дайнэмикс».

Всюду в конструкции зеркала, оптической скамьи, узла размещения и смены приборов в фокусе применяются материалы

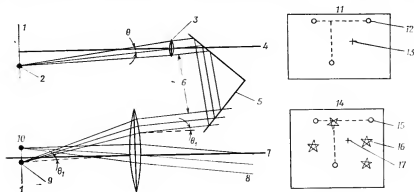


Рис. 4. Принцип работы системы искусственных звезд для привязки координат в фокальной плоскости рентгеновского телескопа к звездному полю в датчике ориентации. Система дает необходимую информацию для коррекции малых смещений рентгеновского телескопа (из документа 2410-III фирмы «Американ сайенс энд энжиниринг»). 1 — фокальная плоскость; 2 — искусственная звезда (показана одна из трех); 3 — телескоп; 4 — оптическая ось рентгеновского телескопа; 5 — угловой отражатель; 6 — параллельные пучки; 7 — оптическая ось системы ориентации (не обязательно параллельна оси рентгеновского телескопа); 8 — свет звезды; 9 — изображение искусственной звезды; 10 — изображение звезды; 11 — фокальная плоскость рентгеновского телескопа; 12 — искусственные звезды; 13 — изображение рентгеновского источника; 14 — фокальная плоскость системы ориентации; 15 — изображения искусственных звезд на тех же угловых расстояниях, что и в рентгеновском телескопе; 16 — изображения звезд; 17 — положение рентгеновского источника относительно искусственных звезд.

с малым коэффициентом теплового расширения. Чтобы уменьшить потери разрешения из-за тепловых деформаций, имеется система активного термоконтроля, поддерживающая узел зеркала при температуре $20 \pm 1^\circ\text{C}$. В то же время использование материалов с малыми и взаимно согласованными коэффициентами теплового расширения позволяет обойтись без более солидной системы терморегулирования и гарантирует неплохое качество даже в случае отказа терморегулятора, потому что в такой конструкции изображение искажается только из-за разностей температур, а не из-за общего изменения средней температуры.

Наконец, еще одним примером реализации принципа терпимого отказа служит взаимозаменяемость приемников в фокальной плоскости, предотвращающая потерю наблюдательных возможностей в случае отказа одного приемника. Вдобавок все наиболее важные системы спутника и обслуживания эксперимента задублированы. Стоимость изготовления, испытания и установки второй системы, как правило, ниже, чем стоимость

первой, включающая также затраты на проектирование. Обсерваторию нельзя чинить после запуска, и чтобы не потерять ее целиком, имеет смысл потратиться на резервные системы. Будущие космические астрономические обсерватории, вероятно, можно будет обслуживать с помощью транспортного корабля «Шаттл», и, следовательно, придется тщательно изучить и сбалансировать стоимость бортового резервирования и незапланированных ремонтов множества различных подсистем.

3. Зеркала

Узел зеркала высокого разрешения предстояло разработать и спроектировать, поэтому он представлялся наименее определенным из существенных компонентов обсерватории им. Эйнштейна. По всей видимости, от него должен был зависеть темп строительства обсерватории, поэтому ему уделили больше внимания, чем другим узлам. Наиболее крупным рентгеновским зеркалом высокого разрешения было до тех пор зеркало, примененное в эксперименте S-054 фирмы «Американ сайенс энд энжиниринг», установленном на платформе АТМ орбитальной космической станции «Скайлэб»; оно было примерно в 10 раз меньше будущего зеркала высокого разрешения обсерватории им. Эйнштейна. В изображении, которое строило зеркало S-054, имелся узкий центральный максимум с полной шириной по уровню 0,5 около 3", но был и значительный ореол: при энергии квантов 1,7 кэВ 50 % падающего излучения попадало за пределы кружка радиусом 48" и только 10 % — в кружок радиусом 5" [60]. Получение более гладких поверхностей для уменьшения рассеяния было и остается основной проблемой в изготовлении рентгеновских телескопов.

До начала основной разработки обсерватории был выполнен ряд предварительных исследований. Были составлены программы расчета теоретических функций отклика зеркала методом «прослеживания лучей». С их помощью установлена эмпирическая связь между разрешением и параметрами оптической системы [63, 14] и исследованы компромиссы в проекте. На рис. 5, а показана теоретическая эффективная площадь зеркала согласно окончательному проекту, а на рис. 5, б — его разрешение. Проводились также экспериментальные измерения рассеяния на полированных плоскостях методом Ценпфеннинга, описанным в [61]. Их целью был выбор подходящего материала для изготовления зеркала. Хотя в этих опытах число образцов было недостаточным для вывода статистических законов распределения, они все-таки показали, что, во-первых, можно отполировать плоскости из плавленого кварца так, что рассеяние

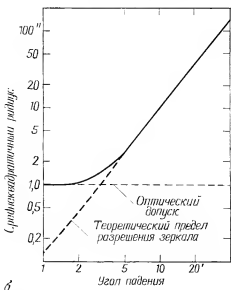
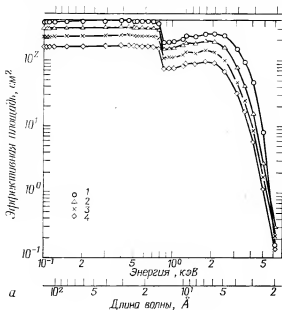


Рис. 5. а — эффективная площадь зеркала высокого разрешения в функции энергии квантов для углов падения 0° (1), 20° (2), 30° (3) и 40° (4); б — теоретическое разрешение зеркала в зависимости от угла падения.

за пределами 1" будет мало, и, во-вторых, напыленное покрытие из никеля или платины, улучшающее отражение при высоких энергиях по сравнению с чистым кварцем, не вносит заметного рассеяния.

Таким образом, нам стало известно, что нет фундаментальных препятствий на пути к изготовлению зеркала секундного качества, хотя, конечно, плоскости гораздо легче отполировать, чем конические поверхности вращения рентгеновских телескопов. Испытывались и другие вещества и методы полировки, однако количество образцов было невелико, так что приемлемые материалы или методы могли бы быть отвергнуты из-за одного дефектного экземпляра. Однако наша цель заключалась в выборе возможного материала и метода, и она была достигнута. Нам помог также опыт изготовления гладких поверхностей для плоских лазерных отражателей и других приложений, в особенности результаты исследований Г. Беннетта, Дж. Беннетта и их коллег.

Выбор в качестве материала плавленого кварца привел к серьезным техническим осложнениям. Например, зеркала эксперимента S-054 были целиком сделаны из бериллия — очень жесткого материала. Плавленый кварц обладает малой жесткостью и должен крепиться в оправе из других материалов. Оправу приходится согласовывать с его малым коэффициентом теплового расширения. Узел зеркала нужно собирать и испытывать на Земле в условиях силы тяжести, а потом использовать на орбите. У. Энтрим, Р. Холл и другие сотрудники механического КБ фирмы «Америкен сайенс энд энжиниринг» пришли к окончательному проекту после множества последовательных приближений, причем важный вклад внесли в него работавшие там в то время ученые и инженеры из фирмы «Перкин—Элмер». Оправа должна удерживать зеркало с малыми искажениями при наземных испытаниях, защищать его в полете, быть стабильной во времени и при смене температуры, не выделять вредных газов и, если можно, допускать разборку и сборку без нарушения юстировки. Этого удалось достичь в конструкции из инвара и графито-эпоксидного композита, показанной на рис. 6. Имеются 4 пары концентрических и конфокальных зеркал; луч падает на параболоид, а потом на гиперболоид. Фокусное расстояние равно 3,44 м, диаметры оптических поверхностей параболоидов от 0,34 до 0,58 м. Отражающие элементы выполнены из плавленого кварца с напыленным слоем никеля. Они крепятся на центральной крепежной плите из инвара и торцевых инварных кольцах; последние скреплены с центральной крепежной плитой графито-эпоксидными цилиндрами. Зеркала из плавленого кварца крепятся к оправе фланцами, удерживающими их в тангенциальном направлении, но специально

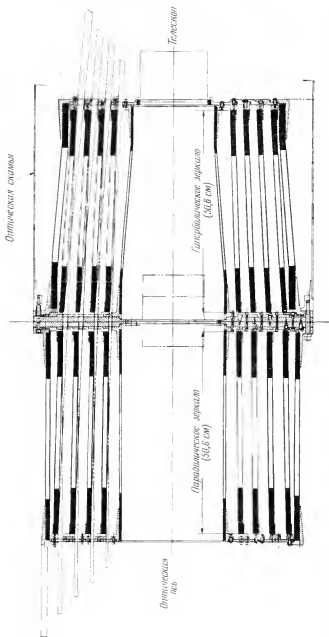


Рис. 6. Механическая конструкция зеркала. Восемь зеркал из плавленного кварца крепятся инварными фланцами; крайние фланцы укреплены на графито-эпоксидных цилиндрах. Узел зеркала крепится за центральную инварную пластину.

ослабленными в радиальном направлении, чтобы радиальные усилия не передавались отражающим элементам.

То обстоятельство, что элементы зеркала из плавленного кварца не были закреплены самостоятельно, сильно осложнило задачу проектировщиков. Зеркала невозможно было отполировать в их окончательных оправках, и, следовательно, их требовалось помещать в оправу, не внося искажений. Сначала думали отполировать стеклянные элементы в технологических оправках и потом перенести отражатели в окончательную оправу, сохраняя все время крепление стекла. Однако такой подход оказался неудачным.

Плавленный кварц для стенок зеркала поставила фирма «Геркус шотт кварцшмельц» из г. Ханау (ФРГ). Примерно конические заготовки получили, сплавляя в центрифуге элементы в форме бочарных клепок. Для завершения соответствующего процесса понадобился почти год.

Зеркало было изготовлено в фирме «Перкин—Элмер» группой под руководством П. Янга. В процессе изготовления узла зеркала группы из Смитсоновской астрофизической обсерватории, фирмы «Америкен сайенс энд энжиниринг» и Центра космических полетов им. Маршалла (НАСА) продолжали тесно сотрудничать с фирмой «Перкин—Элмер». Заслуга в организации кооперации на таком уровне принадлежит в значительной степени фирме «Перкин—Элмер» и особенно непосредственным участникам проекта. Программа от этого выиграла, но, с другой стороны, сотрудникам «Перкин—Элмер», очевидно, пришлось терпеть постоянное присутствие посторонних.

Изготовление зеркал описано в работах [67, 46, 42]. Сначала отражательным элементам придали приблизительную форму алмазной шлифовкой. В этот период измерения более крупных элементов не воспроизводились, потому что упругие деформации технологических оправок изменяли форму оптических элементов. Гораздо большего успеха мы достигли, когда отказались от жестких оправок и попытались добиться нужной формы с помощью свободной шлифовки абразивом. Такой способ в принципе лучше: единственная форма, которая может воспроизводиться с требуемой точностью, соответствует ненапряженному состоянию, а любая поверхность, заданная оправкой, практически невозпроизводима. Однако для получения «свободной» формы требуется немало ухищрений, и в конце концов в процессе измерения пришлось погружать элементы в ртуть.

Основная полировка зеркал производилась в горизонтальном положении изнутри, напоминая описанный в [17] метод «чаша—облучатель», приспособленный к конфигурации рентгеновского телескопа. Работа шла с последовательными приближениями: после коррекции форма поверхности измерялась,

потом проводили повторную коррекцию. Труднее всего было выдерживать допуски на наклон по отношению к оси и гладкость. Большинство допусков было соблюдено.

Трудности в изготовлении зеркала оказались больше, чем встречаются обычно в программах такого масштаба, из-за отсутствия у нас опыта по рентгеновской оптике. Те, кто делал зеркало, не могли проверить его с рентгеновскими лучами; следовательно, все спецификации были косвенными, представляя собой по сути дела технологические допуски, а не параметры, характеризующие качество зеркала. Обширный опыт изготовителей в оптике видимого диапазона нельзя было применить к рентгеновской оптике необычной формы, окончательное качество которой в решающей степени зависит от параметров, зачастую не играющих роли в оптике видимого света. Наконец, в то время теория рассеяния рентгеновских лучей на шероховатых поверхностях была плохо развита и не подкреплена экспериментом. Следовательно, во многих ситуациях решение принималось интуитивно, а не на твердой теоретической или экспериментальной основе. Например, мы знали, что легкое ухудшение степени доводки поверхности зеркала могло привести к значительному снижению качества, но не могли количественно оценить эту потерю. Поэтому мы стремились проводить каждый процесс до тех пор, пока без серьезных изменений технологии достичь дальнейшего существенного улучшения не представлялось возможным. Естественно, это привело к конфликтам с сотрудниками НАСА, отвечающими за бюджет проекта.

Хотя стоимость зеркала составляла менее 5 % полной стоимости обсерватории им. Эйнштейна, задержка его изготовления могла повлечь большие дополнительные затраты. Был тут и психологический момент. Пока зеркало не готово, все другие участники проекта не спешили закончить свои работы. На самом деле дополнительные затраты времени на то, чтобы реализовать предельные возможности технологических процессов и оборудования, измерялись днями и часами и казались нам несущественными в десятилетнем проекте. В отделе планирования НАСА опасались, что потребуется больше времени, и очень болезненно относились к повышению стоимости каждого дня общей программы. Поэтому там были склонны снисходительно относиться к допускам и, если можно, их ослабить. Т. Кирчнер из «Американ сайенс энд энжиниринг» и Р. Янг из «Перкин—Элмер» потратили немало сил на переделку графика, чтобы выкроить лишние часы на проведение важных процессов с минимальными сдвигами окончательного срока приемки. Они также информировали отдел планирования НАСА о ходе проекта. Несмотря на эти усилия, отдел планирования НАСА все-таки отдал фирме «Перкин—Элмер» распоряжение прекратить поли-

ровку внутренних элементов прежде, чем была достигнута требуемая гладкость поверхности. Сделано это было отчасти из-за того, что сроки были нарушены, а для напыления и юстировки, представлявших собой еще не испробованные процессы, могло потребоваться, как думали, больше времени, чем отведено по плану. Эти опасения, хотя и были вполне обоснованы, оказались напрасными.

Сначала в программе предусматривалось изготовление пробного рентгеновского зеркала, чтобы приобрести опыт работы и испытать его по рентгеновским лучам перед окончательной полировкой зеркала спутника. К сожалению, изготовление этого зеркала затянулось настолько, что его не успевали испытать перед окончательной полировкой основного зеркала, поэтому его пришлось исключить из программы. Если бы это зеркало было закончено, оно могло бы помочь и ученым, и администраторам принять более обоснованные решения.

После полировки зеркала покрыли хромом и никелем (именно никель образует отражающую поверхность). Приспособление для покрытия зеркал [46] помещалось внутри конических элементов, чтобы производить напыление перпендикулярно поверхности для уменьшения ее дополнительных шероховатостей. Рентгеновские измерения контрольных образцов, покрытых до и одновременно с рентгеновскими зеркалами, показали, что покрытия не вызывают дополнительного рассеяния.

Отражающие элементы были съюстированы оптически и прикреплены к оправе. Во время этой процедуры каждое зеркало поддерживалось с помощью приложения к нему 32 калиброванных сил, распределенных так, что зеркало практически плавало и могло принять свою естественную форму, соответствующую невесомости; этот весьма удачный прием изобрели в фирме «Перкин—Элмер». Положение зеркал задавалось минимальным набором фиксирующих креплений, сделанных так, чтобы избежать переопределенности и, следовательно, возможности деформировать зеркало. Определить правильность оптической юстировки было нетрудно, но тепловые искажения оправок в процессе крепления вызвали небольшую разъюстировку.

Рентгеновская калибровка отражающей системы описана ниже. Центральная часть ее функции отклика имеет ширину по уровню 0,5 около 3,5" независимо от энергии квантов. Основная часть этого размытия обусловлена зеркалом, хотя приемник и испытательная установка тоже вносят некоторый вклад. Такое качество и ожидалось, исходя из измеренных осевого наклона, вращательной симметрии и ошибок юстировки. Эффективное фокусное расстояние зеркала равно 3,44 м, что соответствует масштабу 1' на 1 мм в фокусе.

Зеркало сохранило свое качество после нескольких месяцев хранения, года сборки, рентгеновской калибровки, запуска и почти двух лет работы на орбите. Качество работы в полете неотличимо от измеренного на земле.

4. Приборы, установленные в фокальной плоскости

В распоряжении наблюдателей, работающих на обсерватории им. Эйнштейна, имеются четыре прибора [25]. Два из них, панорамный приемник высокого разрешения (ППВР) и панорамный пропорциональный счетчик (ППС), обеспечивают, как показывает их название, пространственное разрешение и предназначены для работ, требующих получения изображений. ППВР обеспечивает наивысшее разрешение — практически даже выше, чем у самого телескопа. Однако он не дает разрешения по энергии, обладает малым полем зрения и низким квантовым выходом (если не считать самых длинных волн) по сравнению с ППС. ППС имеет более высокий общий квантовый выход, дает умеренное разрешение по энергии за счет анализа амплитуды импульсов и хорошо отсеивает частицы фона.

Его типичное угловое разрешение составляет $1,5'$, то есть довольно скромное. Два других прибора служат для спектроскопии. Твердотельный спектрометр — это приемник без дисперсии с хорошим квантовым выходом и малым шумом для энергий кванта более 0,8 кэВ. Самое высокое разрешение по энергиям обеспечивает кристаллический спектрометр. При помощи дисперсионной рентгеновской спектроскопии с кристаллическим спектрометром можно наилучшим образом отождествлять и изучать линии в рентгеновских спектрах достаточно ярких источников.

Возможности обсерватории увеличены за счет установки двух дополнительных приборов вне фокальной плоскости. Одним из них является спектрограф с объективной решеткой, с которым при помощи ППВР регистрируются спектры с дисперсией. Спектрограф с объективной решеткой позволяет наблюдать весь спектр точечных источников при энергиях ниже 2 кэВ. С его помощью можно обнаруживать у ярких точечных источников наиболее сильные линии и определить форму континуума. Другой дополнительный прибор состоит из двух фильтров (бериллиевого и алюминиевого). Каждый из них можно поместить перед любым из фокальных приборов, чтобы отсеять мягкие рентгеновские лучи и видоизменить регистрируемый спектр, обеспечив возможность получать широкополосную спектральную информацию с панорамными приемниками. На практике за двадцать месяцев работы обсерватории фильтрами не пользовались, чтобы как можно меньше работала сложная механи-

Таблица 1

Характеристики приборов обсерватории им. Эйхштейна

Прибор	Поле зрения	Пространственное разрешение (диаметр, соответствующий концентрации 50 %) по полю зрения	Эффективная площадь	Разрешение по энергии ($E/\Delta E$ по уровню 0,5)	Разрешение по времени, мкс	Основные области применения
Панорамный прибор высокого разрешения (ППВР)	Диаметр 25'	2" на расстоянии до 5' от оси (определяется зеркалом)	20 см ² на 0,25 кэВ 10 см ² на 1 кэВ 5 см ² на 2 кэВ			8 Изображения с высоким разрешением. Наибольшая чувствительность при длинных экспозициях
Панорамный порционный счетчик (ППС)	60'×60' (исключаются 4 полоски шириной 3')	1,5' на 1,5 кэВ	100 см ² на 0,25 кэВ 110 см ² на 1,5 кэВ 30 см ² на 3 кэВ ^{а)}	1 на 0,25 кэВ 1,3 на 1,5 кэВ 2 на 3 кэВ	63	Изображения диффузных источников. Поток и спектры. Наибольшая чувствительность при коротких экспозициях
Твердотельный спектрометр ¹⁾	Диаметр 6'		110 см ² на 1,5 кэВ 30 см ² на 3 кэВ ^{а)}	14 на 1,5 кэВ 20 на 3 кэВ	2—5000	Недисперсионная спектроскопия

Прибор	Поле зрения	Пространственное разрешение (диаметр, соответствующий концентрации 50 %) по полю зрения	Эффективная площадь	Разрешение по энергии ($E/\Delta E$ по уровню 0,5)	Разрешение по времени, мкс	Основные области применения
Кристаллический спектрометр	Диаметр 6' 1'×20' 3'×30'		1 см ² на 0,25 кэВ 0,1—1 см ² на >0,5 кэВ	50—100 на <0,4 кэВ 100—1000 на >0,4 кэВ	8	Наибольшее спектральное разрешение, измерение профилей линий
Спектрометр с объемной решеткой (работает с ППВР)			<1 см ²	50		Высокое спектральное разрешение, измерение всего спектра точечных источников. Измерение континуума
Мониторный пропорциональный счетчик ²⁾	1,5°×1,5°		667 см ²	5 на 6 кэВ	10 (режим накопления фотонов по времени)	Переменность во времени. Расширение измерений потока на область энергий более 3 кэВ

¹⁾ Закончил работу в сентябре 1979 г., когда кончился охлаждающий.

²⁾ Расположен вне фокальной плоскости.

³⁾ При энергиях >2 кэВ ограничивается зеркалом.

ческая система, ибо в первые дни полета частично вышел из строя механизм бериллиевого фильтра.

Вне фокальной плоскости расположен мониторный пропорциональный счетчик, направленный параллельно оси телескопа. Он работает непрерывно и дает информацию об интенсивности или спектре сильных источников в области высоких энергий, не регистрируемых оптикой скользящего падения. Счетчик служит и для измерений переменности этих величин во времени, как для исследований, связанных прежде всего с вариациями во времени, так и для нужд наблюдателей на панорамных и спектральных приемниках, когда информация об изменениях во времени необходима для интерпретации данных.

В табл. 1 суммированы характеристики всех этих приборов. Ниже они описаны по отдельности. Данный материал представляет собой переработку описания [24, 25] с учетом первых двадцати месяцев работы обсерватории. Приведенные ниже конфигурации приборов соответствуют реально применяемым на обсерватории им. Эйнштейна.

4.1. Панорамный приемник высокого разрешения

Панорамный приемник высокого разрешения (ППВР) разработан в Астрофизическом центре Гарвардской обсерватории специально для обсерватории им. Эйнштейна. В отличие от других приборов, представлявших собой модификацию уже работавших устройств, предназначенных для других целей, здесь не существовало прототипа. Прибор регистрирует изображения с разрешением $1''$ в центральном участке фокальной плоскости диаметром $25'$. Фиксируются отдельные рентгеновские кванты, их координаты в двух измерениях и время прихода. Можно восстановить изображение источника с разрешением, сравнимым с разрешением самого телескопа, а точность положения центров кружков размытия точечных источников зависит только от знания ориентации обсерватории в функции времени. Для дублирования на обсерватории установлены три ППВРа. ППВР подробно описан в [35], ниже приводятся извлечения из этой работы.

Приемник образован двумя каскадами микроканальных пластин (МКП). У первой пластины отношение длины каналов к диаметру (L/D) равно 80, расстояние между их центрами 15 мкм, угол наклона 0° (каналы перпендикулярны поверхности). Вторая пластина имеет $L/D = 80$ и угол наклона каналов 13° . После еще одного промежутка располагаются скрещенные сетки из проволочных нитей. Нити электрически соединены с цепью сопротивлений, а каждая восьмая нить подключена к зарядочувствительному предусилителю. Позади скрещенных

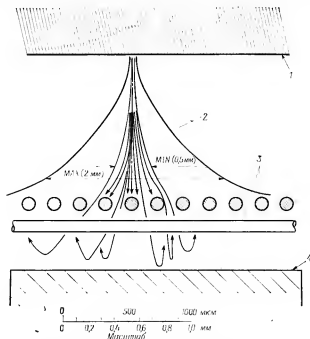


Рис. 7. Схема панорамного приемника высокого разрешения (ППВР). Электронное облако 2, выходящее из задней поверхности микроканальной пластины 1, распределяется по скрещенным сеткам 3. Положение центра зарядового облака по двум координатам определяется по распределению заряда между нитями; 4 — отражатель.

сеток находится металлическая отражающая пластина, необходимая для получения изображений хорошего качества.

Входная поверхность первой МКП покрыта слоем MgF_2 , чтобы увеличить квантовый выход, который зависит от угла падения и энергии квантов. Вдобавок на обе поверхности обеих МКП при изготовлении, как обычно, нанесены никелевые пленочные электроды. Благодаря геометрии телескопа скользящего падения рентгеновские лучи падают на первую пластину под углами $2,5\text{--}5^\circ$ относительно нормали. Примерно каждый десятый квант выбивает фотоэлектрон, образующий на выходе второй МКП импульс из $\sim 10^7\text{--}10^8$ электронов. Как показано на рис. 7, этот зарядовый пакет выходит из нескольких каналов на поверхности 1. Продольные энергии электронов лежат в диапазоне 30—300 эВ, поперечные энергии порядка 30 эВ. Электроны ускоряются вдоль оси, получая еще по 250 эВ. Зарядовое облако в окрестности скрещенных сеток размазывается

на 0,5—2 мм, попадая тем самым на несколько нитей. Такое размытие необходимо для определения координат. Поскольку зарядовое облако собирается несколькими проволоками, его центростроид может быть найден в электронной схеме обработки сигнала с достаточной точностью, так что разрешение достигается малой доли расстояния между нитями.

Измерение центростроида каждой вспышки по двум перпендикулярным направлениям в фокальной плоскости телескопа (параллельной входной поверхности МКП) производится за счет сбора половины заряда на каждой системе скрещенных проволочных сеток. Грубая координата определяется по тому, на какой из 17 предусилителей каждой оси пришел наибольший сигнал. Локальные, или точные, координаты измеряются относительно приближенного положения по распределению заряда на цепи сопротивлений между нитями. Поскольку зарядовое облако распределяется только по нескольким нитям, вспышка будет зарегистрирована не более чем тремя предусилителями. Следовательно, можно упростить электронику, суммируя выходы каждого третьего предусилителя. Такая схема частично защищена от выхода из строя одного предусилителя и обладает большим отношением сигнала к радиочастотному шуму и другим электрическим шумам, типичным на спутнике.

Времени жизни пластин более чем достаточно на предполагаемый срок действия обсерватории им. Эйнштейна, потому что ППВР будет работать примерно 10^7 с (остальное время отводится для других приемников), а ожидаемая скорость счета от большинства известных рентгеновских источников не более 10 с^{-1} . К тому же из-за «дрожания», вызванного работой системы наведения спутника, изображение будет перемещаться по конечной площади на приемнике, так что даже яркие рентгеновские источники не сожгут каналы.

Весь узел с МКП, скрещенными сетками и защитой от ультрафиолетового излучения и ионов заключен в вакуумный кожух. Это дает возможность испытывать пластины на Земле, обеспечивает стабильные условия и при запуске существенно уменьшает нагрузку на защиту от ультрафиолетового излучения и ионов, осуществляемую с помощью тонкой пленки из парилена. Вакуум поддерживается небольшим ионным насосом. На орбите вакуумная заслонка открывается, пропуская на приемник сфокусированный рентгеновский пучок. (Эта заслонка — единственная движущаяся часть в приемнике.)

Каждый приемник содержит систему калибровки в полете из слабого диффузного рентгеновского источника, укрепленного в вакуумной заслонке, сфокусированного ультрафиолетового источника, проектирующего на приемник калибровочную сетку, и нескольких искусственных звезд, изображения которых пере-

брасываются в звездные датчики. МКП обладают весьма незначительной чувствительностью к далекому ультрафиолетовому излучению, что дает возможность регистрировать калибровочную сетку, проектируемую на пластины при помощи ультрафиолетового источника света и соответствующей оптики.

Измеренная на орбите скорость счета ППВР от нерентгеновского фона составила около $5 \cdot 10^{-3}$ импульс \cdot (угл. мин.) $^{-2} \cdot$ с $^{-1}$, что примерно на порядок превышает ожидаемый в фокальной плоскости телескопа поток космического диффузного рентгеновского фона (в областях неба, свободных от сильных источников). Фон втрое больше, чем в лаборатории, и зависит от положения спутника на орбите. В нерентгеновский фон вносят свой примерно равный вклад три компонента. Один из них регистрировался в лаборатории, не зависит от температуры и обусловлен, вероятно, автоэлектронной эмиссией на дефектах МКП — трещинах и раковинах. Другой компонент связан с остаточной чувствительностью к ультрафиолетовому излучению геокороны. Третий связывают с космическими лучами и захваченными частицами, поток которых изменяется вдоль орбиты. С целью резервирования запущены три идентичных приемника.

4.2. Панорамный пропорциональный счетчик

Панорамный пропорциональный счетчик (ППС) — это координатно-чувствительный счетчик, который позволяет зарегистрировать почти все поле зрения обсерватории им. Эйнштейна с умеренным пространственным и спектральным разрешением. Он разработан в Астрофизическом центре Гарвардской обсерватории. Счетчик применяется, как правило, для измерения рентгеновского потока от квазаров, активных галактик и звезд и получения изображений протяженных эмиссионных областей в скоплениях галактик и остатках Сверхновых большого диаметра. Благодаря большому полю зрения ППС на обсерватории им. Эйнштейна были сделаны многие неожиданные открытия источников.

Примером взаимодополняющей работы ППВР и ППС служат наблюдения туманности Андромеды (М31) — близнеца нашей Галактики. На рис. 8 представлена мозаика из трех кадров, сделанных с ППС (поле зрения $60' \times 60'$), покрывающая всю галактику. По распределению самых внешних дискретных источников прослеживается спиральная структура М31. При разрешении ППС в $1,5'$ центральная область галактики разрешается не полностью. Наблюдения центра М31 с ППВР, представленные на рис. 9, показывают, что он разделяется на ~ 30 отдельных дискретных источников. У некоторых из них обнару-



Рис. 8. Мозаика из трех изображений галактических рентгеновских источников в М31, полученных с панорамным пропорциональным счетчиком (ППС). Длина отрезка 10'.

жена переменность во времени, в частности у источника, отождествляемого с ядром М31. По совокупности наблюдений, полученных с ППС и ППВР, удалось обнаружить более 80 источников. С помощью этих данных изучаются распределение рентгеновских источников в пространстве и по светимости и их связь с другими объектами галактики.

Эффективная площадь основного приемника (ППС) в сочетании с зеркалом составляет на оси до 150 см². Эффективная площадь уменьшается при энергиях ниже 1 кэВ из-за поглощения во входном окошке приемника, покрытом слоем полипропилена толщиной 2 мкм и тонким слоем лексана с напыленным изнутри проводящим электродом толщиной 0,2 мкм. При энергиях выше 4 кэВ площадь уменьшается из-за плохой эффективности зеркала.

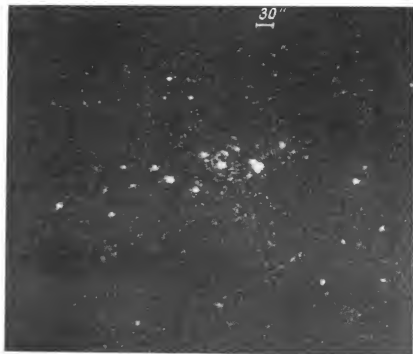


Рис. 9. Изображение центральной части М31, полученное с ППВР. Зарегистрированная ППС протяженная область распадается на множество дискретных источников. Длина отрезка 30".

В корпусе счетчика заключены электроды, погруженные в газовую смесь регулируемой плотности при давлении 800 мм рт. ст. В приемник поступает газ следующего состава: 84 % аргона, 6 % ксенона и 10 % CO_2 . Равновесный состав газовой смеси поддерживается пассивно в системе газоснабжения, компенсирующей потери на диффузию поступлением газа через калиброванное отверстие из баллона. В состав приемника входит калибровочный источник, излучающий флуоресцентную линию алюминия за счет бомбардировки α -частицами. Положение линии алюминия в спектре наблюдается каждые 12—24 ч по амплитудному распределению импульсов для коррекции дрейфа усиления, вызванного изменениями температуры или состава газовой смеси.

В самом начале работы обсерватории им. Эйнштейна пропускание калиброванного отверстия уменьшилось до такой степени, что на равновесную концентрацию CO_2 стала сильно

влиять дифференциальная диффузия через входное окошко. Пришлось активно управлять усилением ППС, устанавливая соответствующее значение анодного напряжения, чтобы усиление оставалось в нужных пределах. В январе 1980 г. был подключен второй клапан параллельно первому. В результате равновесная концентрация CO_2 возросла, усиление приемника стало гораздо менее чувствительным к температуре, и для его установки в допустимых пределах уже не нужно было менять высокое напряжение.

В качестве электрода в ППС служит плоская анодная сетка (вольфрамовые проволоки толщиной 12 мкм, покрытые золотом), расположенная посередине между двумя плоскими сетками катодных нитей (нихром толщиной 75 мкм), идущих перпендикулярно друг другу. Каждая катодная сетка сделана из одной проволоки, намотанной туда и обратно с шагом 1 мм. Расстояние от анода до катодов 2 мм. Анодные импульсы наводят в каждом катоде сигналы, которые распространяются в обе стороны сетки. По разности длительностей передних фронтов импульсов можно определить место прихода рентгеновского кванта, как было предложено впервые в [10]. Диаметр кружка, заключающего в себе 50 % отсчетов от изображения точечного источника, равен 1,5 мм (1,5') при энергии квантов 1,5 кэВ, а при 3 кэВ он уменьшается до 1 мм. Для энергий менее 1,5 кэВ пространственное разрешение ухудшается примерно обратно пропорционально квадратному корню из энергии. Если исправить дисторсию с помощью калибровочных измерений, то центр изображения можно измерить с точностью 20". Таким образом, среднеквадратичная точность (1σ) определения координат точечных источников равна 20".

Дискретизация амплитуд анодных импульсов на 32 уровня обеспечивает умеренное разрешение по энергиям. Собственное разрешение $E/\Delta E$, где ΔE — полная ширина отклика на линию с энергией E по уровню 0,5 от максимума, составляет обычно 1,3 при $E = 1,5$ кэВ. Замечены вариации усиления по рабочей поверхности приемника: от точки к точке разница усилений доходит до 10—20 %. Наиболее трудной частью калибровки ППС является построение карты вариаций усиления, чтобы можно было получать спектры источников с точностью, обусловленной разрешением по энергии и статистикой отсчетов. За два года, прошедшие после запуска, задача еще не решена до конца, но составлена достаточно хорошая карта усиления в центре поля по наблюдениям точечного источника из космоса. На калибровку всего поля потребовался бы месяц наблюдений.

Фон заряженных частиц исключается при помощи проволоочной сетки, расположенной у задней стенки и дающей сигнал для схемы антисовпадений. Дополнительное подавление фона до-

стигается при отсчете положений по методу разности длительностей фронтов. Покрытие окошка лексаном, по-видимому, достаточно хорошо подавляет остаточную чувствительность к ультрафиолетовому излучению. Скорость счета ППС в областях, где нет ярких источников, составляет обычно $5 \cdot 10^{-4}$ импульс $\cdot \text{мм}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в диапазоне энергий 0,25—3 кэВ. Большая часть этого фона, особенно на низких энергиях, объясняется диффузным рентгеновским излучением. Подробнее с устройством приемника можно познакомиться в [30, 33, 36].

4.3. Твердотельный спектрометр

В твердотельном спектрометре, разработанном в Центре космических полетов им. Годдарда, рентгеновские лучи в диапазоне энергий 0,8—4 кэВ наблюдаются с помощью кристалла кремния, легированного литием, в фотометрическом режиме. Этот недисперсионный спектрограф обладает существенно лучшим разрешением по энергии по сравнению с методами пропорционального счета. Разрешение работающего на орбите прибора равно 160 кэВ практически во всем диапазоне энергий. Для излучения с энергией квантов более 1 кэВ эффективная площадь твердотельного спектрометра соответствует площади ППС и гораздо больше, чем у кристаллического спектрометра и спектрометра с объективной решеткой. Следовательно, твердотельный спектрометр — лучший прибор для спектральных наблюдений источников умеренной яркости.

Каждый приемник состоит из кристалла кремния, легированного литием, диаметром 9 мм (рабочий диаметр 6 мм) и толщиной 3 мм, у которого на обратной стороне (соответствующей проводимости *n*-типа) вырезаны две концентрические бороздки. На переднюю поверхность приемника напылен золотой контакт толщиной ≤ 200 Å, чтобы задать смещение в объеме центральной части приемника, ограниченной внутренней бороздкой. В масштабе микронов слой золота имеет неровности. Поэтому для сглаживания среднего пропускания рентгеновских лучей золотым электродом приемник расположен слегка вне фокуса телескопа, чтобы размер внефокального изображения был не более 1 мм². Фильтр из парилена толщиной 0,1 мкм, покрытого алюминием, устраняет чувствительность твердотельного спектрометра к ультрафиолетовому и видимому свету.

Приемники помещены в общий сублимационный криостат на твердых аммиаке и метане, обеспечивающий работу твердотельных устройств при температуре около 100 К. Обеспечено резервирование, поскольку по команде с Земли в фокусе устанавливается один из нескольких приемников. Более подробно прибор описан в [38].

Во время предполетной калибровки был выявлен недочет в криогенной системе. Поверхность приемника постепенно покрывалась льдом из-за криогенного захвата водяного пара, выделяемого изоляцией. Периодически приемник «размораживали» нагреванием до 220 К, но в течение первых семи месяцев полета наблюдения велись обычно при общей толщине слоя льда более 10^{-4} см, который поглощал кванты с энергиями менее 0,8 кэВ. В последние пять месяцев работы положение улучшилось, и нижняя граница пропускания расширилась до 0,55 кэВ. После 11 мес полета был израсходован аммиачно-метановый охладитель и твердотельный спектрометр прекратил работу.

Суммарный фон спектрометра от всех не связанных с источником компонентов равен $0,28 \text{ с}^{-1}$ при энергиях выше 0,5 кэВ и $0,19 \text{ с}^{-1}$ при энергиях выше 1 кэВ. Во время наблюдений источников фон не измеряется, его нужно оценивать по «пустым» экспозициям, сделанным в другое время. Неопределенность в учете фона составляет 10 % и может сказаться на оценках формы спектра очень слабых источников.

4.4. Кристаллический спектрометр

Кристаллический спектрометр — это спектрометр с вогнутым брэгговским кристаллом, разработанный в Массачусетском технологическом институте. Рентгеновские лучи от небесного объекта фокусируются телескопом и проходят через расположенный в фокусе узел диафрагмы и фильтров. Далее пучок расходится в виде кольцевого конуса с углами при вершине $2,5^\circ$ и 5° и попадает на вогнутый дифрагирующий элемент. Излучение, удовлетворяющее условию Брэгга, отражается от кристалла и регистрируется многонитяным пропорциональным счетчиком. Такой метод обеспечивает высокое спектральное разрешение, но обладает сравнительно низкой эффективностью. На рис. 10 приведена схема этого спектрометра. Можно выбрать один из шести дифракционных кристаллов, установленных на турели. Чаще всего использовались кристаллы TAP и RAP, охватывающие диапазоны энергий 0,7—1,2 и 0,5—0,8 кэВ соответственно. В этих диапазонах лежат линии OVII и OVIII.

Взаимное расположение дифракционного кристалла и входной диафрагмы, откуда расходится рентгеновский пучок, задается так, что они лежат на одной окружности (круге Роуланда) с диаметром, равным радиусу кривизны дифракционной решетки. При изменении брэгговского угла меняется также и расположение кристалла относительно фокальной плоскости. Когда кристаллический спектрометр работает в качестве обычного спектрометра с вогнутым кристаллом, приемник тоже

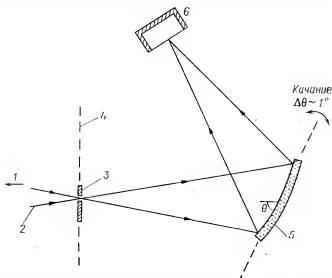


Рис. 10. Схема кристаллического спектрометра. 1 — направление к телескопу; 2 — падающий рентгеновский пучок; 3 — входная диафрагма; 4 — фокальная плоскость; 5 — вогнутый брэгговский кристалл, $\lambda = 2d \sin \theta$; 6 — координатно-чувствительный пропорциональный счетчик.

помещают на круге Роуланда. Здесь дифрагированный рентгеновский пучок фокусируется, образуя астигматическое изображение распределения интенсивности в фокусе телескопа. Эффективная площадь приемника, определенная на Земле после наблюдений, обычно меньше 1 см^2 , поэтому нерентгеновский фон мал.

Какая-либо деталь спектра исследуется с помощью наклонов кристалла на небольшие углы (и, значит, сканирования по длине волны), а положение остальных элементов остается при этом неизменным. При таком сканировании отклонение от условия Роуланда невелико. (Подробнее о приборе см. [13, 18].)

Свойство спектрометра и приемника регистрировать изображения позволяет изучать протяженные источники, например остатки Сверхновых. Их можно наблюдать с одной из четырех диафрагм (размерами $3' \times 30'$, $2' \times 20'$, $1' \times 20'$ и диаметром $6'$).

В своем обычном режиме работы кристаллический спектрометр обладает наибольшей чувствительностью, но его разрешение будет, как правило, ограничено геометрическими искажениями из-за кривизны кристалла. В зависимости от угла падения дифрагированный пучок расходится обычно на $2-20'$. Разрешение протяженных источников ограничивается еще сильнее способностью приемника к регистрации изображений. Для

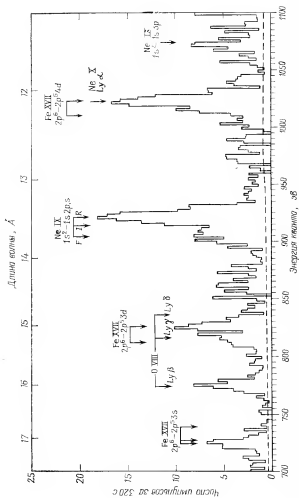


Рис. 11. Рентгеновские линии в спектре остатка сверхновой Рир А по наблюдениям с кристаллическим спектрометром [65].

точечных источников можно улучшить спектральное разрешение, нарушив обычное расположение элементов на круге Роуланда. В этом режиме приемник находится ближе к кристаллу, перехватывая отраженные рентгеновские лучи прежде, чем они сфокусируются в линию. Дисперсия искривленного кристалла используется для увеличения разрешения спектрометра за счет возрастания эффективной площади приемника и, следовательно, нерентгеновского фона.

Приемником служит многоанодный координатно-чувствительный пропорциональный счетчик с резистивными анодами. Он имеет разрешение ~ 1 мм в плоскости спектрометра и ~ 1 см (расстояние между проволочными нитями) в перпендикулярном направлении. Аноды для исключения регистрации нерентгеновских частиц по методу антисовпадений окружают активный объем приемника с трех сторон. Имеются два приемника, снабжаемых газом от той же системы, что и ППС, и имеющих аналогичную систему регулировки давления и подпитки. Прибор работает в диапазоне 0,2—3 кэВ с разрешением $E/\Delta E = 50 \div 500$. Типичное наблюдение состоит в записи скана шириной в 3—5 элементов спектрального разрешения, центрированного на определенную деталь спектра, и длится 5000—40 000 с. На рис. 11 приведен спектр источника Рир А, полученный на кристаллическом спектрометре [65]. Видны детальная структура линий кислорода и других линий.

5. Работа обсерватории

5.1. Введение

Планирование полета и управление обсерваторией им. Эйнштейна представили существенные трудности, ибо происходили в период перехода рентгеновской и космической астрономии от экспериментов с одним ведущим исследователем к системам общенационального пользования. Хотя, согласно контракту с НАСА, строительство и управление поручены одному ведущему исследователю, участники проекта считали спутник мощной обсерваторией, и он действительно стал прибором, которым пользовался широкий круг астрономов. По сравнению с исходными идеями в таких областях, как калибровка, программа полета, управление полетом и анализ данных, значительно увеличилась широта разработок (хотя бюджет возрос незначительно), чтобы продлить период работы аппарата, обеспечить участие в наблюдениях сотен приглашенных наблюдателей и удовлетворить общим требованиям, предъявляемым к постоянно действующей обсерватории.

Потребовался специальный научный центр для согласования программ наблюдений и обработки данных, чтобы повысить научную отдачу обсерватории. Общий системный подход позволил применить ЭВМ для разработки приемников, калибровки, сборки, имитации данных и разработки программ, для составления программы полета и управления в реальном времени, для учета проводимых наблюдений, для обработки, анализа и хранения информации.

5.2. Рентгеновская калибровка

Первый опыт управления приборами обсерватории им. Эйнштейна как единым научным комплексом мы получили в августе—сентябре 1977 г. во время рентгеновской калибровки. При подготовке к ней группа ученых и инженеров из объединившихся организаций, Центра космических полетов им. Маршалла и промышленных фирм-субподрядчиков спроектировала и построила в Центре космических полетов им. Маршалла специальный рентгеновский испытательный стенд.

Потребность в таком стенде была очевидна еще в 1970 г. из предложения о постройке большого орбитального рентгеновского телескопа, поданного объединившимися научными учреждениями. К испытательной установке предъявлялись следующие основные требования: 1) достаточная длина пути в вакууме умеренного качества, позволяющая сфокусировать телескоп на удаленный от него точечный рентгеновский источник; 2) в вакуумной камере должен помещаться весь аппарат с механизмом поворота; 3) рентгеновский источник должен давать линейчатое излучение достаточной интенсивности для измерения эффективной площади и разрешения системы. Мы отдавали себе отчет в том, что масштабы и потенциальная область применения подобной установки выходят за рамки возможностей отдельных экспериментальных групп, и потому рекомендовали построить ее в одном из центров НАСА.

В то время как в 1974—1977 гг. разрабатывали аппаратуру для обсерватории, в Центре им. Маршалла строилась калибровочная установка. В ее состав входили вакуумные насосы, 300-метровая труба, обеспечивающая нужное расстояние между телескопом и источником, вакуумная камера диаметром 6 м и длиной 12 м, вмещающая в себя спутник, и компактный рентгеновский источник, в котором ускоренные электроны облучали сменные мишени из фольги. В процессе разработки и проектирования установки ученые и инженеры дополнительно уточнили такие вопросы, как требования к блендам, предотвращающим попадание в телескоп рассеянных рентгеновских лучей; требования к вакууму в камере телескопа, камере источ-

ника и соединяющей их трубе; требования к юстировке, включая стабильность системы и возможность измерений ее параметров; требования к системе терморегулирования; допуски на чистоту, чтобы не загрязнить отражающую поверхность рентгеновского телескопа; наконец, требования к контролю выходного потока рентгеновского источника во время испытаний. На фотографии (рис. 12) запечатлен момент установки обсерватории им. Эйнштейна в вакуумную камеру калибровочного стенда.

Нелегко было составить программу калибровочных тестов. Желательно было провести тесты для девяти приемников, входящих в состав четырех приборов, на нескольких длинах волн, при многих углах падения и по крайней мере при трех значениях температуры. Поэтому нам было совершенно ясно, что уложиться в выделенные на калибровку 30 дней можно только при эффективной организации отдельных тестов. Мы знали, что перемещения стола для изменения азимута и (или) угла высоты источника относительно телескопа выполняются легко (за 1—2 мин), а на смену температуры уходит больше времени (от нескольких часов до суток). Изменения в расположении приборов и смена мишеней источника занимают от 5 мин до 1 ч.

Основываясь на этой информации, Леон Ван Спейбрук составил программу для оптимизации калибровки на ЭВМ. Программа позволила также точно оценить общее требуемое время и регистрировать ход калибровки по мере ее выполнения. Было составлено расписание, включающее 1397 отдельных тестов. Первоначальный план, предусматривавший работу по 18 ч в течение 30 дней, был переделан на 24-часовую работу в течение 18 сут. На практике это достигалось работой ученых, инженеров, операторов и обслуживающего персонала установок в две смены по 12 ч. Сжатие сроков диктовалось в основном стремлением оставить 12 дней на устранение выявленных дефектов аппаратуры и повторное испытание обсерватории. Наличие такого «резерва» оказалось очень важным, потому что несколько неполадок действительно было обнаружено, и предоставленная этой схемой возможность проанализировать данные первой серии измерений, доработать аппаратуру и вновь испытать прибор сыграла весьма значительную роль в обеспечении успеха.

В программу калибровки входили тесты для определения эффективной площади, масштаба, линейности и полной функции отклика комбинации рентгеновского зеркала с ППВР. На рис. 13 приведен пример функции отклика зеркала и ППВР на точечный источник с энергией 1,5 кэВ, записанной во время этой калибровки. Ее полная ширина по уровню 0,5 равна 3,8", а 50 % мощности заключено в кружке радиусом 5,6". При выбранном на рисунке масштабе центральный максимум нахо-

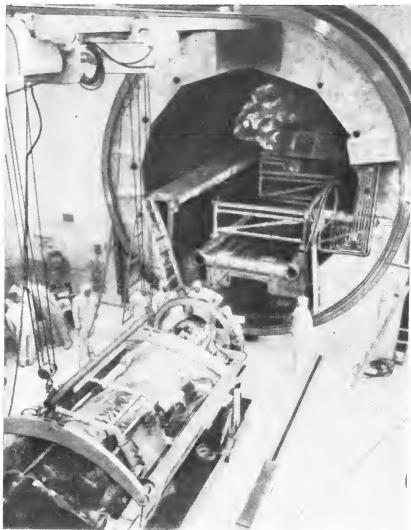


Рис. 12. Фотография обсерватории им. Эйнштейна (спутник НЕАО—В) в момент установки в вакуумную камеру калибровочного стенда в Центре космических полетов им. Маршалла.

дится в области насыщения, чтобы показать крылья изображения.

Были выполнены также тесты, позволяющие определить эффективную площадь, масштаб, функцию отклика, усиление,

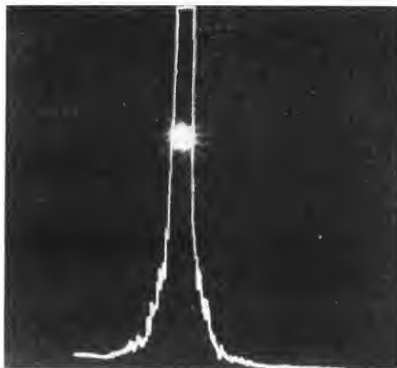


Рис. 13. Функция отклика системы зеркал ППВР обсерватории им. Эйнштейна на точечный источник при энергии 1,5 кэВ, измеренная во время калибровки в Центре космических полетов им. Маршалла (см. текст).

разрешение по энергии и чувствительность к величине порога ППС. Измерения с тремя спектрометрами служили в основном для определения их эффективности, масштаба и разрешения по энергии.

Важной особенностью калибровки была параллельная разработка программ для анализа большого количества полученной информации, превышающего результаты месяца наблюдений из космоса. Большая часть этих программ послужила основой программного обеспечения обработки и анализа данных, поступающих после вывода обсерватории на орбиту. Подготовка этих программ заранее и опыт совместной работы научных групп — участников проекта при калибровке в значительной степени помогли нам справиться с обработкой данных и получить реальные научные результаты сразу после запуска.

5.3. Подготовка к полету

Планирование полета началось почти за 3,5 года до запуска, причем один из специалистов (Э. Шрейер) целиком посвятил себя разработке системы управления и сбора данных. Функции «управления» состоят, вообще говоря, во-первых, в создании программы наблюдений, начиная с научных задач и кончая подробным графиком, и, во-вторых, в управлении и слежении за спутником в реальном времени. Практически требуется сформулировать принципы управления, определить детальные условия, необходимые для их осуществления, разработать соответствующие системы обработки данных, программ и аппаратуры, а также процедуры. На самом деле весь процесс совершается последовательными приближениями с учетом соотношений между проектом аппаратуры и ее ограничениями, организационных и финансовых ограничений и ограничений системы управления.

Сразу же выявилось несколько трудностей. Ученые организаций-участников могли технически грамотно сформулировать стратегию наблюдений, но у них не было достаточного знакомства с существующими в НАСА ограничениями системы управления полетом и организацией центра управления. Сотрудники НАСА хорошо знали управление спутниками вообще, но не вполне понимали научные требования. Гибкость, необходимую для получения максимальной научной отдачи, они считали несовместимой с планированием научной работы и жесткими правилами, соблюдения которых всегда требовали. За 2,5 года до запуска, когда планирование уже шло полным ходом, было слишком поздно и слишком накладно вносить существенные изменения в экспериментальное оборудование или аппаратуру спутника. Эта трудность возникла из-за запоздалого начала подготовки к управлению полетом и разделения организационных обязанностей. Очевидно, впредь следует принимать во внимание управление полетом на более ранних этапах, при проектировании приборов и выборе формата команд. По мере разработки приборов нужно создавать информационные системы для команд и телеметрии, совместимые с центром управления. И сотрудники НАСА, и экспериментаторы должны с самого начала понять важность управления полетом. Для эффективного проведения этих работ нужно выделять достаточное количество людей и средств в начале осуществления программы.

Некоторые трудности были связаны с финансовой стороной дела. Делались попытки избежать модификаций аппаратуры, изменяя методы работы и программы. Это не всегда удавалось. Хорошим примером служит попытка продлить срок работы спутника. В периоды стабильного наведения предусматривалась

разгрузка силовых маховиков от избыточного момента, вызванного градиентом силы тяжести, с помощью реактивных движков управления ориентацией. По мере того как все больше людей стали понимать научное значение полета и возможность нескорого запуска следующего такого аппарата, задумались о добавлении моментного магнитопривода с целью продлить срок работы спутника. Хотя технически это было возможно, такое решение сочли слишком дорогим и потому отвергли. Однако в конечном счете пришли к соглашению продлить срок действия обсерватории, и были проведены серьезные исследования по выбору тактики смены объектов, способа управления и программ с целью уменьшить расход газа реактивных движков. Количество потраченных на это человеко-лет обошлось дороже, чем стоила бы модификация спутника для продления его жизни. Даже теперь «контроль момента» остается решающим фактором при составлении графика наблюдений, и многие наблюдательные задачи оставлены из-за ограничений, связанных с продлением срока работы.

Главным в текущей работе по управлению спутником является загрузка бортового программно-временного устройства. Это затруднение обусловлено еще одним компромиссом. Уже давно поняли, что управлять обсерваторией очень сложно, а схемы смены объектов, которые потом потребовались для ограничения момента, только усугубили положение. Возможностей бортового программно-временного устройства и системы контроля и определения ориентации явно едва хватало, однако решили, что при разумном использовании их будет достаточно. Для того чтобы заставить эффективно работать бортовые системы, понадобилось разработать немало программ, и дважды в сутки приходится сталкиваться с трудными управленческими задачами при загрузке и проверке программно-временного устройства.

Хотя эти и другие трудности показывают, что некоторые из финансовых решений были, возможно, не вполне обоснованы, совместными усилиями специалистов из НАСА, фирмы TRW и научных организаций удалось найти решения и преодолеть имевшиеся ограничения. Без этой коллективной работы успешный полет обсерватории был бы невозможен.

5.4. Научная работа

Спустя два года после запуска программа наблюдений обсерватории им. Эйнштейна состоит примерно из 10 000 пунктов, соответствующих отдельным астрономическим наблюдениям. Организация этих наблюдений началась с наблюдательной программы участвующих в проекте организаций, распро-

страненной в предварительном виде в мае 1977 г. и после переработки формально оглашенной в июне 1978 г. под названием «Программа наблюдений объединенных учреждений на рентгеновской обсерватории НЕАО—В».

Как указано во введении к этой главе, ученые объединенных учреждений и НАСА договорились сразу же поставить программу приглашенных наблюдателей, тем самым отказываясь от традиционного права ведущего исследователя на исключительное использование информации, полученной в течение первого года. Ученые считали, что обязательно нужно составить список объектов, которые они будут наблюдать в течение выделенных им 80 % времени первого года наблюдений, чтобы приглашенные наблюдатели располагали достаточной информацией для предложения новых независимых наблюдений, параллельных наблюдений и (или) совместных исследований. Хотя на первый взгляд этот первый список, содержащий более 3000 объектов, мог бы обескуражить потенциальных приглашенных наблюдателей (действительно, замечания по этому поводу имели место), жизнь показала, что на самом деле это не проблема. За первые два года работы по программе приглашенных наблюдателей было получено и оценено комиссией более 500 предложений, и почти 400 из них, включающие наблюдения более 2000 объектов, приняты к осуществлению. К марту 1980 г. около половины этих объектов уже пронаблюдали. Увеличение доли наблюдательного времени, отводимого приглашенным наблюдателям, которая к апрелю 1981 г. должна достичь 50 %, дает возможность принять еще больше программ, а также дольше наблюдать отдельные источники. В Астрофизическом центре за программу приглашенных наблюдателей отвечает Фред Сьюэрд.

Для поддержки программы приглашенных наблюдателей был создан комитет пользователей из учреждений-участников, приглашенных наблюдателей и представителей НАСА. Комитет подает свои предложения ведущему специалисту, выполняющему обязанности директора обсерватории. Комитет собирается один раз в квартал для общего анализа работы обсерватории. Обсуждаются качество работы приборов, график наблюдений объектов, ход обработки данных, а также возможные усовершенствования. Большинство приглашенных наблюдателей, имеющих дело с изображениями, обрабатывают свою информацию в Астрофизическом центре. Обычно они приезжают туда на неделю. В это время им помогают научные сотрудники и операторы Центра. «Руководство для наблюдателей обсерватории им. Эйнштейна» помогает при пользовании системой обработки данных.

Составление наблюдательной программы организаций-участников и аналогичного списка на второй год полета оказалось полезным и в некоторых других отношениях. Списки послужили основой для разрешения конфликтов и устранения дублирования в отдельных программах учреждений — участников проекта. Объекты разделены на группы. Это облегчает планирование будущих наблюдений и организацию разумных проектов по научному анализу данных. При помощи списков создается также на ЭВМ «Каталог наблюдений на обсерватории им. Эйнштейна» (КН) — основа для составления программ полета и хранения данных.

В КН содержится следующая информация: название объекта, его прямое восхождение и склонение, используемый прибор, желательное и реализованное время наблюдений, имя наблюдателя и место его работы, текущая потребность в наблюдениях и ход обработки данных. Каждому объекту, включаемому в КН, присваивается свой постоянный порядковый номер, а также номер в порядке возрастания прямых восхождений, который, однако, меняется по мере включения новых объектов, ибо КН непрерывно обновляется.

На составление графика наблюдений объектов влияют несколько факторов. Во-первых, объект должен находиться в полосе шириной 30° , перпендикулярной линии Земля—Солнце, чтобы солнечные батареи могли вырабатывать достаточно электроэнергии. Следовательно, объект может наблюдаться по меньшей мере один месяц из шести. Во-вторых, требуется выбирать объекты так, чтобы уменьшить нагрузку на силовые гироскопы и расход газа в реактивных движках ориентации. С этой целью выбирают объекты, оптимально расположенные относительно орбиты спутника (пассивный контроль момента) и такие поледовательности объектов, которые способствуют противодействию возмущающему моменту (активный контроль момента). Такая тактика была весьма успешной, и по современным прогнозам запаса газа в движках, рассчитанного на 13 мес, на самом деле хватит более чем на два года работы обсерватории на орбите.

Исходя из списка доступных объектов, раз в месяц определяется последовательность смены приборов. Один прибор может работать от суток до трех недель. Далее принимаются во внимание дополнительные факторы, например правильное распределение наблюдательного времени между учреждениями — участниками проекта и приглашенными наблюдателями, а также степень приоритета среди нескольких объектов одного наблюдателя. Из графиков на несколько дней формируется список объектов на месяц, называемый основной программой наблюдений. Эта программа, переполненная примерно на 30 %, за 1—

3 недели передается в группу оперативного планирования обсерватории им. Эйнштейна в Центре космических полетов им. Годдарда. Группа, состоящая из сотрудников учреждений — участников проекта, Центра и фирмы TRW, создает затем детальный график наблюдений. С помощью имеющихся в Годдардовском центре программ определяется последовательность наведения на объекты, требуемая для эффективного контроля момента, с учетом и таких факторов, как покрытия Землей, потеря информации при прохождении Южно-Атлантической аномалии, требования к движениям при переходе с объекта на объект и наличие подходящих гидрированных звезд для управления ориентацией спутника и ее определения. Результатом этой работы является детальная программа наблюдений, то есть список конкретных объектов и команд, передаваемых на спутник примерно каждые 12 ч. Затем бортовое программно-временное устройство и ЭВМ системы ориентации на основе этого списка команд и выделенного количества времени выполняют заданную программу наблюдений.

5.5. Система обработки данных

Разработка системы сбора научных данных обсерватории началась одновременно с оперативным планированием, примерно за 3,5 года до старта. Когда стали ясны общие принципы управления полетом, составили предварительную схему потоков информации и системы ее научного анализа и изучили возможные варианты выбора ЭВМ. Было вполне естественно и целесообразно вести эти работы под тем же научным руководством.

На ЭВМ возлагалось несколько важных функций: имитация эксперимента и анализ калибровочных измерений, оперативное планирование (создание текущей программы наблюдений, учет наблюдений, быстрый контроль), разработка программ, обработка и анализ данных, хранение и передача данных.

Таким образом, в Астрофизическом центре был организован вычислительный комплекс обсерватории им. Эйнштейна в соответствии с определенными принципами и целями. Эти цели заключались в том, чтобы 1) дать возможность разработчикам приборов принять активное участие в разработке программ (для этого нужна эффективная система разделенного пользования, допускающая диалог с ЭВМ); 2) координировать научную работу всех наблюдателей обсерватории, сотрудников учреждений, участвующих в проекте, и приглашенных наблюдателей (программы наблюдений будут составляться незадолго до их реализации); 3) анализировать все данные и хранить их

для последующего использования; 4) разработать хорошую систему обработки изображений; 5) достичь этих целей с малыми и почти «фиксированными» затратами.

Было очевидным, что ЭВМ должна работать как специализированная. Задачи по оперативному планированию, управлению и быстрому анализу данных должны пользоваться очень высоким приоритетом. Анализу и выдаче информации другим пользователям также следует обеспечить высокий приоритет. Наконец, в будущем неожиданные проблемы и требования могут заставить нас перераспределить приоритеты, учитывая фиксированный бюджет. Изложенные соображения привели к созданию системы, основанной на специализированных мини-ЭВМ, управляемых научными сотрудниками обсерватории.

На выбор типа ЭВМ кроме ее параметров повлияли некоторые другие факторы, в частности, совместимость с оборудованием и программами, применяемыми в лаборатории и при разработке приборов, знакомство с построением и устройством ЭВМ, наличие мощной операционной системы. Первые два условия очевидны, они позволяют пользоваться и обмениваться существующими программами и устройствами и оптимизировать конфигурацию ЭВМ. Последнее условие приобретает особое значение для автоматизации системы обработки данных, включающей в себя много программных модулей, причем направление обработки может меняться в зависимости от результатов предыдущих этапов.

Вычислительный комплекс обсерватории им. Эйнштейна состоит из двух независимых вычислительных систем на основе ЭВМ «Eclipse» фирмы «Дейта дженерал». Имеющиеся устройства перечислены в табл. 2.

«Операционная» система предназначена для текущего планирования полета и обработки данных. Доступ к ней ограничен, машина служит чем-то вроде автоматической линии для передачи данных. Система «пользователей» используется для диалогового анализа данных и разработки новых программ. Она также обслуживает две системы обработки изображений (цветные дисплей емкостью $512 \times 640 \times 8$ бит) и координатно-измерительную машину. Обычно обе ЭВМ обмениваются между собой информацией. Хотя по составу и работе ЭВМ совершенно независимы, они полностью согласованы друг с другом и на каждой из них можно путем перестройки реализовать любую функцию.

Большая часть программ по анализу данных создана самими учеными. Те, кто лучше всего знаком с приборами, отлаживают программы и всегда готовы их изменить в соответствии с реальной работой приборов. После запуска значительные изменения были внесены группой профессиональных программистов, рабо-

Таблица 2

Вычислительная аппаратура обсерватории им. Эйнштейна*Производящая система (для первичной обработки данных)*

ЭВМ «Eclipse» S/230, емкость памяти 512 байт
3 диска (200+200+100 мегабайт)
5 магнитофонов 800/1600 байт/мм
АЦПУ — графопостроитель
6 терминалов, скорость 9600 бод
Телефонная линия, скорость 300 бод
Соединительный модуль КАМАК для связи с ЭВМ пользователей

Система пользователей (для научного анализа данных)

ЭВМ «Eclipse» M600, емкость памяти 1024 кбайт
3 диска по 200 мегабайт
2 магнитофона 800/1600 байт/мм
АЦПУ — графопостроитель
АЦПУ, скорость 600 линий в минуту
10 терминалов, скорость 9600 бод
Соединительный модуль КАМАК для связи с производящей системой и дисплеями
Координатно-измерительная машина (оцифровка по двум осям)
2 дисплея (512×640 элементов разрешения)

тающих вместе с учеными. Было бы исключительно полезно получить такую помощь еще до запуска.

Программное обеспечение, удовлетворяющее основным требованиям и правилам для наземных систем, обладает некоторыми особенностями:

1. Имеется солидный «Каталог наблюдений» (КН), включающий список объектов и текущую информацию о программе наблюдений, обработке и хранении. Сведения об ограничениях на возможность наблюдений, запланированном и реализованном времени наблюдений, степени завершения обработки данных, расположении данных в архиве автоматически обновляются и могут быть получены при помощи программы — редактора каталога.

2. Текущая обработка полуавтоматизирована с помощью сложной системы программных макромодулей. Система сопоставляет поступающие данные с КН, выполняет нужные программы по их обработке и остается готовой к повторению операций. Обычно системой управляют операторы, вмешательство ученых требуется только вначале (определение приоритета при обработке) и в конце (оценка качества). НедIALOGовая обработка данных включает в себя декоммутацию, анализ ориентации, генерацию файла изображения или спектра, обнаружение источников в первом приближении и хранение информации.

3. Спроектированы основные форматы хранения информации, ориентированные на эффективную работу с системой обработки изображений и учитывающие принципы эффективного хранения.

Темп поступления информации с обсерватории им. Эйнштейна составляет 6,4 килобит/с, из них около 5 килобит/с является научной информацией. Как правило, скорость счета от источников мала, и время обработки обусловлено временем наблюдений. Для текущей первичной обработки данных требуется примерно $\frac{2}{3}$ рабочего времени одной ЭВМ. Оставшаяся часть ее возможностей используется для быстрого контрольного анализа информации и оперативного планирования. На системе пользователей обычно одновременно анализируют данные 20—30 ученых—сотрудников Центра, гостей и приглашенных наблюдателей. Часто она бывает перегружена, и увеличение мощности вдвое было бы вполне оправданно.

Нетрудно обобщить опыт работы на обсерватории им. Эйнштейна для оценки потребностей рентгеновских наблюдений следующего десятилетия в вычислительных средствах. Мы предполагаем, что для спутников рентгеновской астрономии следующего десятилетия придется увеличить мощность системы обработки данных по меньшей мере в 10 раз.

6. Научные результаты

Рентгеновская астрономия уже зарекомендовала себя как мощный инструмент для решения некоторых важных проблем современной астрофизики таких, как конечные стадии звездной эволюции, существование черных дыр, природа источников энергии в ядрах активных галактик и квазарах, крупномасштабная структура и эволюция Вселенной. В некоторых случаях рентгеновская астрономия обеспечивает нам средства изучения материи, находящейся в таких физических состояниях, которые недоступны наблюдениям в оптическом и радиодиапазоне.

С выводом на орбиту обсерватории им. Эйнштейна, обладающей средствами для получения изображений и повышенной (до 500 раз по сравнению с предыдущими наблюдениями) чувствительностью, рентгеновская астрономия вышла на передовые рубежи астрофизики. В течение двух лет были выполнены наблюдения 4000 объектов и зарегистрировано 8000 отдельных рентгеновских источников. Наблюдались звезды почти всех типов, имеющихся в нашей Галактике; получены рентгеновские изображения остатков сверхновых, галактик и скоплений галактик; зарегистрированы некоторые квазары, возможно являющиеся наиболее удаленными из всех объектов, когда-либо наблюдавшихся с помощью оптических телескопов.

Ниже мы кратко обрисуем итоги исследований в тех областях, где результаты наблюдений обсерватории им. Эйнштейна оказались наиболее значительными, а также отметим прогресс, который может быть достигнут с выводом на орбиту усовершенствованной установки для рентгеновских астрофизических исследований AXAF в конце 80-х годов.

6.1. Звездные короны

Ранние наблюдения, выполненные с помощью обсерватории им. Эйнштейна, позволили зарегистрировать более 150 звездных рентгеновских источников низкой светимости. Во многих случаях их положения определены в рентгеновской области с точностью до 4", и потому их отождествление не вызывает сомнений. В случае панорамного пропорционального счетчика неопределенность положения составляет 60", и здесь вероятность ошибки больше. Однако при наличии такой большой выборки немногие ошибочные отождествления не могут поколебать основного вывода, что источниками звездного рентгеновского излучения являются звездные короны [57]. На рис. 14 показана диаграмма Герцшпрунга—Рессела для всех звезд, зарегистрированных при рентгеновских наблюдениях избранных объектов из числа ближайших звезд с известным спектральным классом и светимостью. Для немногих типов звезд, у которых не было зарегистрировано рентгеновского излучения (сверхгиганты и гиганты поздних спектральных классов), верхний предел светимости довольно высок. На рис. 15 показана зависимость рентгеновской светимости от спектрального класса.

Хотя принятые представления, связывающие излучение короны с турбулентностью на поверхности звезды (через посредство генерации акустических волн и диссипации их энергии), недостаточны для объяснения результатов этих наблюдений, невозможно отрицать связь между образованием и нагревом короны и интенсивностью поверхностных движений. Мы попросту не понимаем, как действует механизм, обеспечивающий эту связь. Здесь значительную роль могут играть вращение звезды, конвекция, динамо-генерация поверхностных магнитных полей. Объяснение связи между этими процессами и рентгеновским излучением звездных корон является одной из главных задач, стоящих перед будущей усовершенствованной установкой для рентгеновских астрофизических исследований AXAF. Ее чувствительность, в сотни раз более высокая, чем у обсерватории им. Эйнштейна, позволит увеличить число наблюдаемых звездных корон до нескольких тысяч и выполнить детальные спектральные исследования для сотен близких источников.

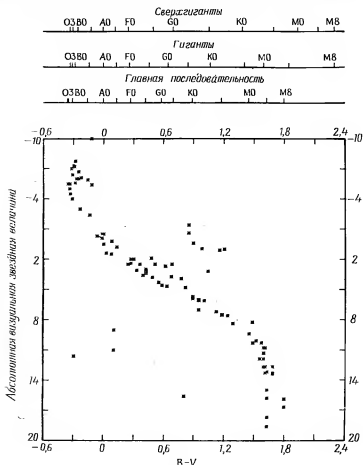


Рис. 14. Диаграмма Герцшпрунга—Ресселя для звезд, зарегистрированных обсерваторией им. Эйнштейна. Показаны только звезды, для которых можно определить абсолютную визуальную величину.

Рентгеновские наблюдения в ближайшем будущем позволят оценить вклад звезд (особенно карликов поздних спектральных классов) в диффузное излучение, а также выяснить распределение масс в звездных скоплениях в нашей и других галактиках. Учитывая существующую оценку предельной чувствительности AXAF и принимая средние значения рентгеновской светимости поздних М-карликов, полученные обсерваторией им. Эйнштейна, можно надеяться, что AXAF позволит исследовать звезды типа dM вплоть до $V=22^m$. Таким образом, рентгеновские наблю-

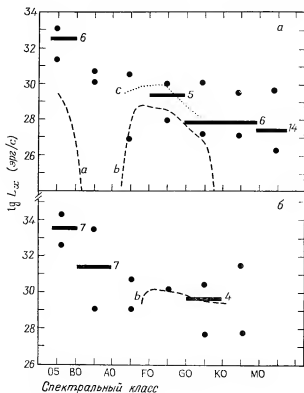


Рис. 15. Зависимость рентгеновской светимости L_x от спектрального класса для звезд, зарегистрированных обсерваторией им. Эйнштейна (см. рис. 14). *a* — главная последовательность; *b* — гиганты и сверхгиганты. Горизонтальными отрезками показаны средние значения L_x , а точками — минимальные и максимальные значения.

дения будут служить мощным средством для изучения пространственного распределения этих звезд, сравнимым по эффективности с самыми чувствительными наземными оптическими телескопами.

6.2. Интенсивные рентгеновские источники в двойных системах

Обсерватория им. Эйнштейна внесла существенный вклад в наше понимание природы интенсивных рентгеновских источников в двойных системах. Было зарегистрировано примерно 100 таких источников в туманности Андромеды. Поскольку все

эти источники находятся на одинаковом расстоянии от нас, мы можем построить верхнюю часть кривой функции светимости и начать определение состава звездного населения и характера эволюции.

В будущем можно ожидать огромного прогресса в детальном изучении этих рентгеновских источников в результате проведения хронометрических наблюдений с использованием спутника серии «Эксплорер» и детальных спектроскопических исследований на обсерватории AXAF. Наблюдения спектральных изменений (например, в флуоресцентных линиях железа и, возможно, в других линиях) в зависимости от фазы позволят наложить ограничения на геометрическую конфигурацию и физические условия в зоне эмиссии вблизи центрального объекта, будь это белый карлик, нейтронная звезда или черная дыра. Длительное время жизни обсерватории AXAF обеспечит возможность исследовать спектральные изменения на больших интервалах времени и таким образом внести ясность в вопросы, касающиеся, например, свободной прецессии нейтронной звезды и природы переноса массы от звезды-гиганта к ее компактному компаньону.

6.3. Шаровые скопления

Систематическое изучение шаровых скоплений с помощью обсерватории им. Эйнштейна позволило уточнить координаты уже известных рентгеновских источников и обнаружить два новых. Общее число обнаруженных источников, связанных с шаровыми скоплениями, дошло до восьми. Точность предварительных координат этих источников составляет около $1'$. В некоторых случаях измеренное расстояние источника от оптического центра скопления значительно превышает $1'$. Анализ показывает, что если массы этих объектов примерно одинаковы, то типичное значение массы должно быть существенно больше средней массы для звезд скопления. Функция правдоподобия резко падает при значениях масс выше $M_x = 5M_\odot$, свидетельствуя о том, что эти источники не являются черными дырами с массами в сотни раз больше солнечной [31].

Повышение точности определения координат, которое будет достигнуто с помощью обсерватории AXAF, даст возможность еще лучше обосновать этот вывод. В частности, мы сможем проверить предположение, что все эти объекты имеют одинаковую массу. Например, пусть будет обнаружено, что несколько источников располагается на расстоянии меньше $0,05r_c$ от центра скопления, а остальные — на расстоянии больше, скажем, $0,5r_c$, где r_c — радиус ядра. Тогда можно будет сделать вывод, что некоторые из этих объектов очень массивны и скорее

всего представляют собой черные дыры, в то время как другие имеют меньшую массу и являются нейтронными звездами, имеющими в качестве компаньона обычную звезду.

6.4. Остатки Сверхновых

В настоящее время в рентгеновском диапазоне зарегистрировано более двадцати остатков Сверхновых, в том числе несколько в Большом Магеллановом Облаке. С помощью обсерватории им. Эйнштейна были получены детальные изображения многих из этих объектов с разрешением, составляющим от одного до десяти процентов от их протяженности. Сравнение структур отдельных остатков Сверхновых по наблюдениям в рентгеновском, оптическом и радиодиапазоне позволит прояснить наши представления о динамике ударных волн и происхождении электронов высоких энергий, ответственных за радиоизлучение. Наблюдения с помощью твердотельного спектрометра обсерватории им. Эйнштейна [7] обеспечили важную информацию о состоянии ионизации и содержаниях тяжелых элементов в некоторых остатках Сверхновых. На примере двух молодых остатков — Крабовидной туманности и Кассиопеи А — можно проиллюстрировать современное состояние таких исследований, их потенциальные возможности и присущие им ограничения.

Рентгеновские изображения Крабовидной туманности с ясно различимым эффектом пульсара показаны на рис. 16. Разделяя данные наблюдений на интервалы в соответствии с фазой, можно измерить поток излучения для периода, когда пульсар «выключен». В частности, по измерениям в этот период был получен верхний предел для остаточного планковского рентгеновского излучения с поверхности нейтронной звезды. Этот предел соответствует светимости меньше $1,3 \cdot 10^{34}$ эрг/с, или поверхностной температуре не более $2,5 \cdot 10^6$ К при радиусе 10 км [32].

Протяженная область эмиссии, наблюдаемая в Крабовидной туманности, не имеет оболочечной структуры и, по-видимому, обусловлена синхротронным излучением электронов высоких энергий, ускоренных пульсаром. Если и существует какое-либо излучение, вызванное ударной волной вокруг расширяющейся оболочки, то его интенсивность слишком низка для регистрации на фоне нетеплового излучения.

С помощью обсерватории AXAF можно будет исследовать структуру Крабовидной туманности в зависимости от энергии рентгеновского излучения в диапазоне 0,2—8 кэВ. Полученная информация наряду с картами изофот в оптическом и радиодиапазоне позволит нам составить довольно полную картину

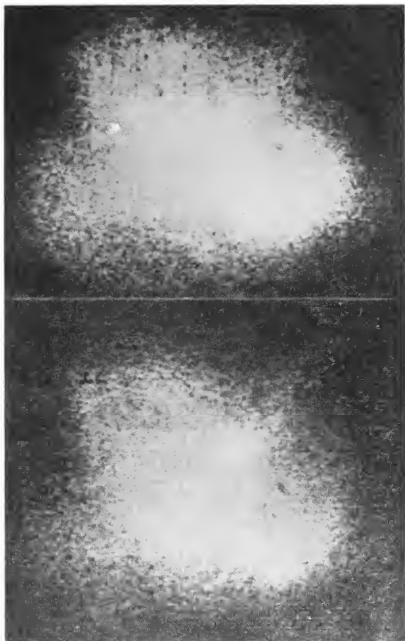


Рис. 16. Изображения Крабовидной туманности, полученные с помощью панорамного прибора высокого разрешения обсерватории им. Эйнштейна. Вверху — пульсар «включен», внизу — «выключен».



Рис. 17. Изображение остатка Сверхновой Cas A, полученное с помощью панорамного прибора высокого разрешения обсерватории им. Эйнштейна.

ускорения и диффузии энергичных электронов в туманности. Включение в комплект аппаратуры рентгеновского поляриметра было бы особенно полезным для изучения структуры магнитных полей и обнаружения нетеплового компонента излучения в других остатках Сверхновых.

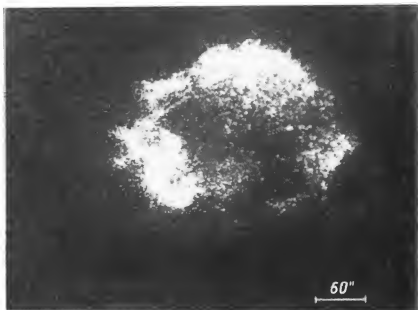
Совершенно иное строение имеет самый молодой из галактических остатков Сверхновых — Кассиопея А. Рентгеновское изображение, приведенное на рис. 17, показывает оболочечную структуру. В случае Кассиопеи А поиски компактного объекта приводят к верхнему пределу, соответствующему планковской температуре не выше $1,5 \cdot 10^6$ К при радиусе нейтронной звезды 10 км [49].

На рис. 18 представлены изображения этого остатка Сверхновой в рентгеновском, оптическом и радиодиапазоне. Сравнение этих изображений показывает общее сходство картин в рентгеновской и оптической областях спектра, особенно конфигураций высокоскоростных сгущений («узлов»), которым соответствуют наиболее яркие детали рентгеновского изображения. В оптических спектрах этих сгущений отмечают сильные линии кисло-

рода и серы, а рентгеновский спектр Кассиопеи А (рис. 19) содержит сильные линии кремния, серы и аргона [7]. Таким образом, наблюдения согласуются с предположением, что сгущения содержат вещество, переработанное в недрах звезды и выброшенное при взрыве Сверхновой. Как рентгеновское, так и радиоизображение свидетельствуют о существовании слабого гало, или внешней оболочки, расположенной непосредственно за областью ярких сгущений. Эта деталь интерпретируется как ударная волна в межзвездной среде, вызванная взрывом. Наблюдения высокотемпературной составляющей рентгеновского спектра Кассиопеи А согласуются с такой интерпретацией [53]. Исходя из предположения о наличии гидростатического равновесия между компонентами газа с различной температурой, Фабиан и др. [20] получили оценку $15M_{\odot}$ для массы вещества Кассиопеи А, излучающего в рентгеновской области. Как следует из этой оценки, звезда — предшественник Сверхновой была довольно массивной, что согласуется также с условиями, требуемыми для обеспечения наблюдаемых содержаний элементов в сгущениях, где, согласно наблюдениям, отмечаются движения вещества с чрезвычайно высокими скоростями [1, 15, 41].

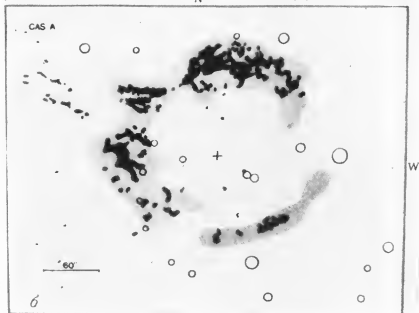
Высокое спектральное и пространственное разрешение, обеспечиваемое обсерваторией AXAF, позволит проследить изменения температуры внутри оболочки остатка Сверхновой, что даст возможность более детально исследовать энергетику и динамику взрыва Сверхновой, а также последующих процессов, связанных с эволюцией остатка Сверхновой.

Один из наиболее интересных результатов, полученных при изучении остатков Сверхновых с помощью обсерватории им. Эйнштейна, состоит в том, что лишь немногие из них содержат центральный точечный рентгеновский источник. Либо образование нейтронных звезд вследствие взрывов Сверхновых не является общим правилом, либо возникшие нейтронные звезды способны остывать гораздо быстрее, чем ожидается [34]. Поскольку предсказываемая скорость охлаждения нейтронной звезды зависит от сделанных предположений о соотношении различных внутриядерных процессов, то существует реальная и захватывающая возможность применять рентгеновские телескопы для исследований в ядерной физике. Зарегистрированные значения или верхние пределы поверхностной температуры нейтронной звезды, представленные как функция возраста остатков Сверхновых, наблюдавшихся обсерваторией им. Эйнштейна, можно сравнить с соответствующими значениями, предсказанными различными моделями охлаждения нейтронной звезды. Отрицательный результат попыток зарегистрировать излучение от Кассиопеи А и SN 1006, а также низкий уровень излучения



α

N



δ

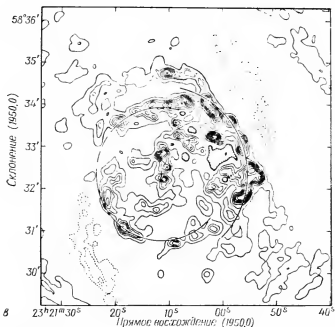


Рис. 18. Рентгеновское (а), оптическое (б) и радионизображение (в) остатка сверхновой Cas A.

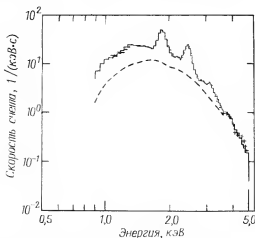


Рис. 19. Спектр Cas A по измерениям с помощью твердотельного спектрометра обсерватории им. Эйнштейна. Для сравнения приведен расчетный график, соответствующий отклику твердотельного спектрометра на изотермическую двухкомпонентную модель. Нижняя (штриховая) кривая показывает вклад в спектр легких элементов (H, He, C, N, O, Ne).

от Крабовидной туманности в периоды «выключения» пульсара позволяют предположить, что по крайней мере «стандартная» нейтронная звезда в этих остатках Сверхновых отсутствует [56].

Повышенная в 100 раз чувствительность обсерватории АХАФ в отношении точечных источников обеспечит возможность либо непосредственно обнаруживать нейтронные звезды, либо снизить не менее чем в три раза верхние температурные пределы для остатков Сверхновых, наблюдаемых в высоких широтах. Это позволит наложить жесткие ограничения на разработанные модели нейтронной звезды и исключить большинство из них.

6.5. Туманность Андромеды

Исследования нормальных галактик выполняются с целью сравнить характеристики этих объектов в рентгеновской области спектра с их морфологией и составом. В случае М 31 оказывается возможным выделить отдельные рентгеновские источники и произвести отождествление некоторых из них с объектами, наблюдаемыми в оптической области. Панорамный пропорциональный счетчик (ППС) позволяет построить карту изолиний для всей галактики с умеренным разрешением. Наблюдения с ППВР используются, чтобы разрешить источники в ядре и определить точные положения источников в спиральных рукавах. Основная научная цель этих наблюдений состоит в нахождении распределения указанных источников по светимости и последующем сравнении с соответствующими распределениями в других галактиках, таких, как Магеллановы Облака и Млечный Путь.

В М 31 обнаружено почти 100 отдельных рентгеновских источников со светимостью в диапазоне 0,5—4,5 кэВ, превышающей 10^{37} эрг/с. По светимости они сравнимы с самыми мощными источниками, наблюдаемыми в нашей Галактике. Среднее значение светимости для источников в М 31, равное 10^{38} эрг/с, несколько выше соответствующего значения для галактических источников.

На рис. 8 и 20 показаны рентгеновские изображения М 31 [62, 64]. Приведенные на рис. 8 изображения, полученные с помощью панорамного пропорционального счетчика, наложены на оптическую фотографию с целью проиллюстрировать наличие корреляции между отдельными деталями. Изображения рис. 20, полученные с помощью ППВР, показывают область ядра галактики, разрешенную на отдельные источники. Один из таких источников, относящийся к наиболее мощным во всей галактике, совпадает с ее оптическим центром. Различия между

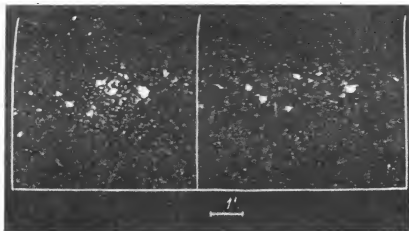


Рис. 20. Два изображения центральной области галактики М 31, полученные с помощью панорамного прибора высокого разрешения обсерватории им. Эйнштейна. Снимок № 579 (слева) получен в январе, а № 4479 (справа) — в августе 1979 г. Заметно отсутствие по меньшей мере одного из сильных источников на правом снимке.

двумя изображениями, показанными на рис. 20, свидетельствуют о наличии переменного источника.

В целом рентгеновские источники, по-видимому, соответствуют определенным деталям оптического изображения галактики. Существует значительная корреляция между яркими рентгеновскими источниками и другими индикаторами населения I типа, такими, как ОВ-ассоциации, облака HI и CO, зоны HII и области с сильным поглощением. Отмечается также сильная концентрация источников к центральной области галактики. В нашей Галактике, судя по распределению рентгеновских источников, эта область по размерам в десять раз больше. Никакого объяснения этому различию пока не найдено, хотя отмеченный эффект весьма значителен: в М 31 около трети всех ярких рентгеновских источников располагаются в центральной области, содержащей всего лишь 1,5 % общей массы галактики.

Текущие планы наблюдений на обсерватории им. Эйнштейна предусматривают дополнительные исследования близлежащих эллиптических, типа SO, спиральных и неправильных галактик, характеризующихся широким диапазоном морфологических типов, цветов и светимостей.

Есть все основания ожидать, что с выводом на орбиту спутника АХАФ эти исследования, начатые обсерваторией им. Эйнштейна, будут существенно расширены. Число галактик, доступных для регистрации в рентгеновской области, возрастет

в 10^3 раз. Высокая чувствительность АХАФ делает возможной регистрацию и исследование отдельных мощных рентгеновских источников внутри галактик, расположенных в окрестности 20 Мпс. Таким образом, исследования, аналогичные наблюдениям М 31 с обсерватории им. Эйнштейна, будут выполнены для тысяч других галактик.

6.6. Скопления галактик

Научное оборудование обсерватории им. Эйнштейна, обеспечивающее получение изображений в рентгеновской области, позволяет достигнуть нового уровня в детальных исследованиях скоплений галактик. Программой наблюдений предусмотрены следующие исследования: 1) детальное изучение ярких скоплений как с умеренным, так и с высоким разрешением; 2) общий обзор с целью измерения светимости, поверхностной яркости и размеров для большого числа относительно близких ($z \leq 0,2$) скоплений; 3) обзор удаленных скоплений для изучения процессов эволюции.

Среди результатов, полученных при выполнении этой программы, можно отметить: а) измерение массы галактики М 87 на основе распределения излучающего газа в ее гравитационном поле; б) обнаружение излучающих областей вокруг галактик М 86 и М 84 из скопления в созвездии Девы; в) наблюдение нескольких различных морфологических структур скоплений в рентгеновской области; г) наблюдения удаленных ($z \geq 0,2$) скоплений, которые, возможно, свидетельствуют об эволюции этих объектов в отношении температуры и рентгеновской светимости.

Галактика М 87 расположена в центре скопления в созвездии Девы. Она выглядит как рентгеновский источник, заметно выделяющийся из общего излучения скопления и сильно (примерно в 100 раз) превосходящий по яркости все другие галактики скопления. Наблюдения с помощью ППС свидетельствуют о наличии гало из слабосветящегося вещества с массой примерно $3 \cdot 10^{13}$ масс Солнца [21]. Такой вывод следует из анализа зависимости поверхностной яркости от радиуса, представленной на рис. 21, в предположении, что излучающий газ в гравитационной потенциальной яме галактики М 87 находится в состоянии гидростатического равновесия. По распределению поверхностной яркости можно определить изменение плотности газа с радиусом. Если принять температуру газа в скоплении равной $2,5 \text{ кэВ}^1$ и проследить изменение поверхностной яркости вплоть до радиуса 230 кпс, где рентгеновское излучение М 87 сливается

¹ 1 кэВ соответствует температуре $1,16 \cdot 10^7 \text{ К}$. — *Прим. ред.*

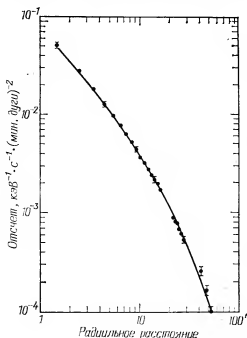


Рис. 21. Кривая поверхностной яркости галактики М 87 в диапазоне энергий 0,7—3,0 кэВ. Вычтен фон, связанный с излучением скопления в созвездии Девы и с внутренним шумом приемника.

с общим фоном излучения всего скопления, то для гравитационной массы, обеспечивающей связь горячего газа с М 87, получится значение $3 \cdot 10^{13}$ масс Солнца.

Подобный же анализ можно выполнить и для скоплений в целом, в особенности таких, которые характеризуются гладким и азимутально-симметричным профилем поверхностной яркости. Получающиеся при этом значения массы составляют около 10^{14} масс Солнца, что согласуется с оценками на основе теоремы вириала. Таким образом, подтверждается предположение, что массивные гало, подобные наблюдаемому вокруг М 87, встречаются довольно часто.

Два других мощных рентгеновских источника в скоплении в Деве, следующие по яркости за М 87, связаны с эллиптическими галактиками М 86 и М 84. На рис. 22, где представлено изображение, полученное с помощью ППС, протяженный источник совпадает с М 86, а галактика М 84 расположена к востоку от него. Протяженная деталь с северной стороны М 86 отме-

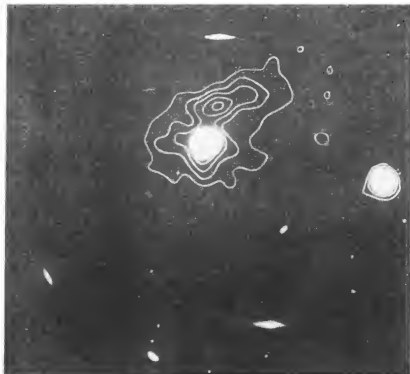


Рис. 22. Изображения галактик М 86 и М 84 из скопления в созвездии Девы, полученные с помощью панорамного пропорционального счетчика. Карта изолиний интенсивности рентгеновского излучения наложена на фотографию в видимых лучах. Заметен выступ изолиний рентгеновского излучения галактики М 86 (в центре), интерпретируемый как «хвост» из газа, покинувшего галактику.

чается и на изображениях этой области, полученных с высоким разрешением.

Область излучения, непосредственно связанная с галактикой М 86, является протяженной и имеет изотермическое ядро радиусом около $2,5'$ (~ 15 кпс) с температурой несколько килоэлектронвольт. Сравнительно высокая скорость М 86 по отношению к центру скопления (1500 км/с) позволяет предположить, что эта галактика движется по орбите, простирающейся далеко за пределы ядра скопления. В периоды, когда галактика удалена от ядра скопления, вещество, выбрасываемое ее звездами, накапливается и образует гало. Когда же галактика проходит через ядро скопления, динамический напор присутствующего там газа с температурой 10 кэВ и плотностью $5 \cdot 10^{-4}$ см $^{-3}$

срывает внешнюю часть гало [23]. Наблюдения «хвоста» из горячего газа у М 86 могут свидетельствовать о наличии именно такого процесса. В противоположность этому галактика М 84 представляет собой гораздо менее протяженный рентгеновский источник с радиусом ядра всего лишь $20''$ (2 кпс). Ее скорость по отношению ко всему скоплению гораздо ниже, и, по-видимому, в своем движении по орбите она не выходит за пределы ядра скопления. Эта галактика постоянно испытывает действие динамического напора окружающего ее горячего газа и потому лишена внешнего гало. Схематическое изображение скопления в Деве, согласно данным рентгеновских наблюдений, показано на рис. 23.

Рентгеновские наблюдения свидетельствуют о большом разнообразии структур скоплений, от широких и весьма клочковатых распределений массы до плавных распределений с четко выраженным центральным максимумом (рис. 24 и 25). По-видимому, эти морфологические различия отражают процессы динамической эволюции скоплений [37]. Так, например, в скоплении А 1367 некоторые максимумы интенсивности рентгеновского излучения связаны с яркими галактиками, подобно тому как это отмечалось для скопления в Деве. В обоих этих скоплениях основным источником рентгеновского излучения является сравнительно низкотемпературный (несколько кэВ) газ, принадлежащий галактикам. Некоторая часть газа покинула галактики, но осталась в относительно неглубокой гравитационной потенциальной яме скопления.

По мере эволюции скопления его гравитационная потенциальная яма становится глубже, скорость орбитального движения галактик увеличивается и все большая часть газа покидает галактики под действием динамического напора. Интенсивность рентгеновского излучения межгалактической среды, как и ее давление, постепенно растет, а темп удаления газа из галактик ускоряется. Наконец, взаимодействие галактик друг с другом и с межгалактической средой приводит к плавному распределению плотности высокотемпературного (10 кэВ) газа, с четко выраженным центральным максимумом. Скопления А 85, А 2319 и скопление в созвездии Волосы Вероники, по-видимому, достигли этой поздней стадии эволюции.

Скопления, показанные на рис. 26, возможно, представляют промежуточную стадию эволюционного процесса. Картина изолиний интенсивности их рентгеновского излучения показывает характерную двойную структуру. Можно предполагать, что члены скопления последовательно объединяются в группы по две, четыре, восемь, шестнадцать и т. д. галактик, и в итоге скопление оказывается состоящим из двух таких частей. Последние в конце концов сливаются, образуя скопление, подобное

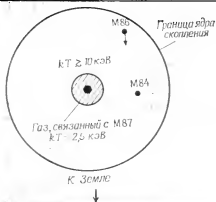


Рис. 23. Структура скопления галактик в созвездии Девы. Галактика М 86 входит в область ядра скопления, а М 87 окружена плотным облаком газа.



Рис. 24. Карта изолиний интенсивности рентгеновского излучения для скопления галактик А 1367, наложенная на фотографию в видимых лучах. Представлены smoothed данные рентгеновских измерений с панорамным пропорциональным счетчиком. Точечный источник (в южной части рисунка) отождествляется с объектом 3С 264 (NGC 3864).

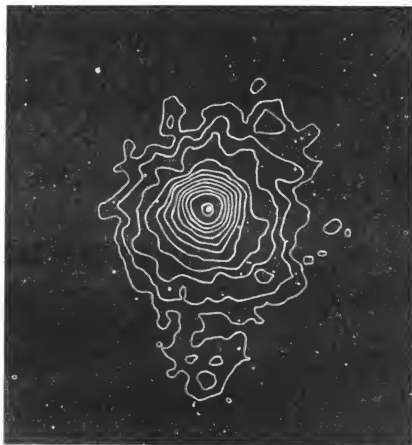


Рис. 25. Карта изолиний интенсивности рентгеновского излучения для скопления галактик А 85, наложенная на фотографию в видимых лучах. Представлены сглаженные данные рентгеновских измерений с панорамным пропорциональным счетчиком.

наблюдаемому в созвездии Волосы Вероники. Роль галактик типа cD в эволюции скоплений остается неясной. Данные наблюдений свидетельствуют о наличии двух основных категорий скоплений: 1) с cD-галактикой, расположенной в центре (скопление в Деве, А 85), и 2) без такой центральной галактики, излучающей в рентгеновской области (А 1367, скопление в созвездии Волосы Вероники). В обоих этих случаях четко прослеживается эволюционная последовательность от объектов с неправильной клочковатой структурой к скоплениям с хорошо выраженной центральной концентрацией масс. Существование

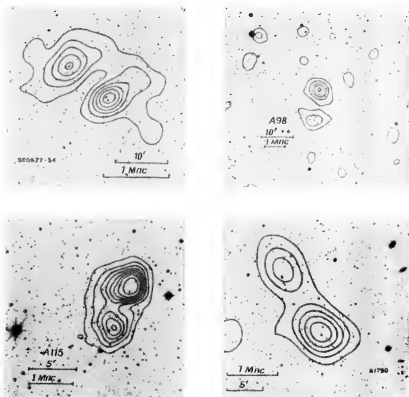


Рис. 26. Карты изолиний интенсивности рентгеновского излучения для нескольких скоплений галактик (A 98, A 115, A 1750, SC 0627—54), свидетельствующие о наличии двойной структуры. В этих скоплениях отмечается концентрация галактик, соответствующая данным рентгеновских измерений.

доминирующей эллиптической галактики в скоплении может быть просто начальным условием, определяющим конкретный вид эволюционного трека. В табл. 3 представлены примеры скоплений, относящихся к указанным двум категориям.

Эволюционные модели для описанных выше скоплений галактик свидетельствуют о тенденции к росту их рентгеновской светимости и температуры со временем, поскольку количество газа в скоплении и напряженность гравитационного поля в его центральной области по мере эволюции растут. Справедливость этих моделей можно проверить на основе статистики, наблюдая рентгеновское излучение удаленных скоплений и производя сравнение с данными для относительно близких скоплений. В среднем мы должны наблюдать более далекие скопления на

Таблица 3

Два типа скоплений галактик

Скопления с центральной галактикой, излучающей в рентгеновской области	Скопления без центральной галактики, излучающей в рентгеновской области	Эволюционные индикаторы
Дева (М 87), А 262, А 2199	А 1367, А 2634	Низкая дисперсия скоростей. Значительная доля спиральных галактик. Низкие рентгеновские температуры (~ 2 кэВ). Иррегулярное распределение галактик
А 85, А 1795	Волосы Вероники, А 2256	Высокая дисперсия скоростей. Незначительная доля спиральных галактик. Высокие рентгеновские температуры (~ 8 кэВ). Регулярное распределение галактик с центральной конденсацией

более ранних стадиях эволюции, и, следовательно, отмечать для них более низкие значения температуры и светимости. Полученные с помощью обсерватории им. Эйнштейна данные для скоплений с $z = 0,75$ согласуются с этой картиной [52].

Наблюдения обсерватории им. Эйнштейна не позволяют дать четкие ответы на вопросы, касающиеся масс отдельных галактик, взаимодействия галактик с газом внутри скопления, происхождения этого газа, эволюции скоплений, а также роли сD-галактик в эволюции. Необходимы продолжительные исследования с применением более совершенной спектральной аппаратуры, обладающей повышенной чувствительностью. Только такие исследования позволят найти распределения температуры, плотности и содержания элементов внутри скоплений.

Эта информация даст возможность получить какие-то свидетельства, касающиеся происхождения газа в скоплениях и механизмов его нагрева. Более широкий спектральный диапазон обсерватории AXAF (0,1—8 кэВ), обеспечивающий чувствительность в гораздо большем интервале температур, покрывает и очень важную область излучения К-оболочки железа вблизи 8 кэВ. Таким образом, станут возможными непосредственное наблюдение материала, переработанного внутри галактик, и измерение красного смещения. Будут доступны регистрация и пространственное разрешение скоплений вплоть до $z = 3$, что позволит изучать происхождение и эволюцию скоплений.

6.7. Активные галактики и квазизвездные объекты

Обсерватория им. Эйнштейна зарегистрировала рентгеновское излучение практически у всех объектов с активными ядрами, таких, как сейфертовские галактики I и II типа, радио-

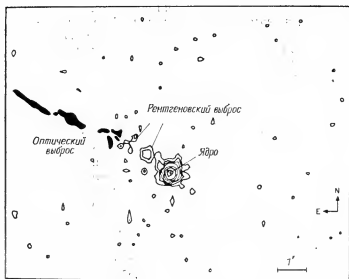


Рис. 27. Карта изолиний интенсивности рентгеновского излучения для области вокруг ядра радиогалактики Сеп. А. Хорошо заметен выброс к северо-востоку от ядра. Показано также положение диффузных образований, открытых Дюфуром и ван ден Бергом при оптических наблюдениях [19].

галактики, N-галактики, объекты типа BL Ящерицы и квазары. По-видимому, наиболее важные результаты были получены при обзоре квазаров и наблюдении выбросов в объектах Центавр А, М 87 и 3С 273.

К примеру, наблюдения близкой радиогалактики Центавр А свидетельствуют о наличии «выброса» субрелятивистской плазмы, соединяющего компактный источник в ядре и протяженные внутренние радиообласти. На рис. 27 приведена карта рентгеновских изотоп, полученная с помощью ППВР для области ядра галактики Центавр А. Показана также внутренняя часть «выброса», наблюдавшегося в оптической области Дюфуром и ван ден Бергом [19]. По наблюдениям в рентгеновской области, «выброс» направлен так же, как в оптической, и простирается на несколько минут дуги от ядра до внутренней радиообласти.

Интерпретация этого «выброса» как потока горячей плазмы позволяет объяснить природу источника энергии, выделяющейся в радиообластях. Рентгеновское и видимое излучения «выброса» согласуются с механизмом излучения горячей плазмы. Кинетическая энергия плазменного потока должна обеспечивать мощ-

ность, достаточную для объяснения природы излучения радиообластей, если некоторая ее часть (1—10 %) преобразуется в энергию релятивистских электронов через посредство ударных волн и магнитогидродинамической турбулентности [54].

Однако рентгеновские «выбросы» наблюдаются также у M 87 и 3C 273. Соотношение интенсивностей излучения этих «выбросов» в рентгеновском, оптическом и радиодиапазоне согласуется с механизмом синхротронной эмиссии. Нельзя исключать, что этот механизм действует и в радиогалактике Центавр А.

Спектроскопические наблюдения обсерватории AXAF позволят получить самые непосредственные данные по вопросу о том, имеет ли излучение ядра, выброса и радиообластей нетепловую природу и какова связь между указанными компонентами структуры данного объекта. Повышенная в 100 раз чувствительность даст возможность зарегистрировать статистически достаточное число активных галактик различных классов. Появится возможность построить функцию светимости, количественно оценить эволюцию более удаленных объектов и выяснить природу рентгеновского излучения активных ядер галактик, а также его связь с источником энергии этих ядер.

Наблюдения квазизвездных объектов (КЗО) с помощью обсерватории им. Эйнштейна показали, что практически все эти объекты являются сильными рентгеновскими источниками. Продолжая работу Тананбаума и др. [55], Заморани и др. [68] сообщили о наблюдениях 107 КЗО, из которых у 79 было зарегистрировано рентгеновское излучение. Результаты этих наблюдений свидетельствуют о сильной корреляции между рентгеновским и радиоизлучением КЗО. Так, среди КЗО определенной оптической светимости рентгеновская светимость радиоизлучающих КЗО в 2—3 раза выше, чем у радиоспокойных КЗО. Кроме того, существует предположение, что отношение рентгеновской светимости к оптической уменьшается с увеличением красного смещения или оптической светимости.

Зарегистрированные к настоящему времени КЗО имеют рентгеновскую светимость 10^{43} — 10^{47} эрг/с в диапазоне 0,5—4,5 кэВ. Функция светимости для этих объектов пока не определена, поскольку наблюдения не обеспечивают полной статистической выборки. По мере накопления данных наблюдений КЗО в рентгеновской области можно будет получить выборку, свободную от систематических ошибок и эффектов селекции, присущих обзорам в оптическом и радиодиапазоне. Уже имеющиеся данные позволяют исследовать корреляцию между потоками излучения в рентгеновском, оптическом и радиодиапазоне. Соотношение между рентгеновской и оптической светимостями определяется отдельно для радиоизлучающих и радиоспокойных

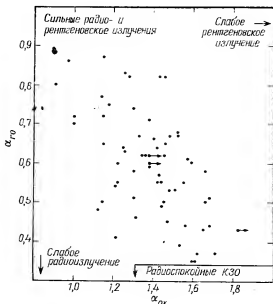


Рис. 28. Соотношение α_{70} и α_{ox} для 62 радиоизлучающих квазаров. Стрелками показаны направления ослабления для радио- и рентгеновского излучений. Более 90 % радиоспокойных КЗО имеют значения α_{ox} в области, отмеченной в нижней части диаграммы.

КЗО. Как показывает рис. 28, корреляция светимости в рентгеновском и радиодиапазоне довольно значительна. Изучение интегральной функции распределения для показателя α_{ox} , связывающего плотности потоков в оптической (2500 Å) и рентгеновской (2 кэВ) областях, свидетельствует о том, что радиоизлучающие КЗО в среднем в три раза ярче в рентгеновской области, чем радиоспокойные.

Среднее эффективное отношение рентгеновской светимости к оптической можно определить по данным для этих двух классов КЗО, если учесть долю объектов каждого класса. Полученное таким образом значение $\bar{\alpha}_{ox} = 1,45$ было использовано Заморани и др. для вычисления вклада КЗО в фоновое рентгеновское излучение и для определения числа КЗО, доступных для регистрации в обзорах обсерватории им. Эйнштейна. Применяя функцию оптической светимости из работы [12] и принимая предельную величину $m_B = 20$, что соответствует предельному потоку при рентгеновских обзорах, равному $2,6 \times 10^{-14}$ эрг/(см²·с), Заморани и др. нашли, что КЗО ответственны примерно за 25 % общего фона рентгеновского излуче-

ния. Согласно этим оценкам, наблюдаемая плотность КЗО должна составлять 13 объектов на квадратный градус, что хорошо согласуется с результатами, полученными на обсерватории им. Эйнштейна.

Если принять предельную величину $m_B = 21,2$, оставляя прежним значение α_{ox} , то излучением КЗО можно объяснить все 100 % рентгеновского фона. Таким образом, либо функция оптической светимости должна уплощаться до значения $\mu_B = 21$, либо отношение рентгеновской светимости к оптической после $\mu_B = 20$ должно уменьшаться. Существуют независимые свидетельства уплощения функции оптической светимости при $\mu_B = 20$, полученные из подсчетов КЗО, выполненных в оптической области [6, 9, 40].

Рентгеновские наблюдения КЗО составляют основу для создания моделей механизмов излучения этих объектов. Как радиоизлучающие, так и радиоспокойные КЗО должны иметь центральный источник энергии, обеспечивающий излучение в оптическом и радиодиапазоне в соответствии с значением $\alpha_{ox} \approx 1,5$. По крайней мере один из параметров этого источника должен быть переменным, чтобы объяснить большой разброс наблюдаемых отношений потоков в рентгеновской и оптической областях спектра. В радиоизлучающих КЗО должен действовать и другой механизм, вызывающий повышение рентгеновского потока по сравнению с оптическим. Это может быть излучение горячей плазмы, синхротронное излучение с относительно плоским спектром или же синхрокомптоновское излучение.

Детальные исследования интенсивности, переменности, спектрального распределения и поляризационных свойств излучения КЗО с помощью обсерватории AXAF позволяют получить непосредственную информацию о природе источника излучения. Например, если в основе механизма рентгеновского излучения лежит комптоновское рассеяние фотонов в облаке горячих электронов, то измерение зависящих от энергии характерных времен в период вспышечной активности обеспечит описание исходного спектра, а также рассеивающей области. Если в спектре КЗО имеются рентгеновские линии излучения или поглощения, наблюдения спектров с умеренным разрешением дадут возможность зарегистрировать эти линии при красных смещениях, превышающих $z = 3$. Обсерватория AXAF будет использоваться также для получения обширных полных выборок КЗО в рентгеновской области, позволяющих провести сравнение с выборками в оптическом и радиодиапазоне. Появится возможность получить и уточнить распределения КЗО по звездным величинам, красному смещению и светимости, а также исследовать эволюцию этих объектов на основании данных рентгеновских наблюдений.

6.8. Обзоры: зависимость $\lg N - \lg S$

Цель программы обзорных наблюдений обсерватории им. Эйнштейна состоит в поиске рентгеновских источников и повышении предельной чувствительности при регистрации объектов. Как отмечалось в предыдущих разделах, телескоп и приемники излучения обсерватории обеспечивают повышение чувствительности при регистрации точных источников более чем в 500 раз по сравнению с предыдущими инструментами. Были выполнены серии систематических наблюдений с ППС и ППВР, предусматривающих регистрацию источников с предельной плотностью потока $2 \cdot 10^{-14}$ эрг/(см²·с) в диапазоне энергий 1—3 кэВ [24, 48]. Этот предел примерно соответствует 2×10^{-3} импульс/с при измерениях, проводившихся на спутнике «Ухуру» для источников со спектром, аналогичным рентгеновскому фону. Помимо этих «глубоких» обзоров, охвативших площадь в несколько квадратных градусов, выполнялся также обзор с умеренным разрешением на более значительной (примерно 24 квадратных градуса) площади (частное сообщение Маккаро и др., 1980). Этот «промежуточный» обзор включал в себя наблюдения с ППС, предусматривающие выбор оптимальной экспозиции и подходящих объектов, не содержащих сложных или диффузных источников излучения.

Основные научные цели этих обзоров состояли в следующем:

- 1) изучение распределения рентгеновских источников по интенсивности и зависимости распределения от типа объекта;
- 2) оценка вклада дискретных рентгеновских источников в изотропный фон;
- 3) открытие новых классов рентгеновских источников.

«Глубокие» обзоры проводились на нескольких участках неба. К настоящему времени выполнен предварительный анализ результатов для четырех участков. Мы зарегистрировали 15 источников на уровне значимости не ниже 5σ при предельном значении потока $1,3 \cdot 10^{-14}$ эрг/(см²·с) в диапазоне 1—3 кэВ. Предполагая степенной характер распределения источников

$$dN/dS = As^{-(\alpha+1)}, \quad N(>S) = N, \quad S^{-\alpha},$$

мы аппроксимировали наблюдаемое распределение указанной функцией. При этом принимались во внимание различия участков обзора по степени охвата и чувствительности. После введения систематических поправок [47], учитывающих неопределенность значения потока и небольшое число источников, представленных в выборке, была получена оценка $\alpha_c = 1,63$ с нормировкой $N(S > 1,3 \cdot 10^{-14}) = 1,4 \cdot 10^5$ ср⁻¹. Эти значения, характеризующие распределение рентгеновских источников в зависимости от интенсивности, позволяют оценить вклад дискретных

источников в изотропный фон. Предполагая, что в среднем эти источники по характеру спектра подобны фону, мы нашли, что в диапазоне 1—3 кэВ вклад источников с потоками, превышающими $1,3 \cdot 10^{-14}$ эрг/(см²·с), составляет $\sim 24\%$ общей интенсивности фона. Если указанные параметры распределения сохраняются и при более низких значениях потока, то все излучение фона будет определяться источниками с потоками больше $2,5 \cdot 10^{-15}$ эрг/(см²·с). Их регистрация требует чувствительности, в 10 раз превосходящей предельную для обсерватории им. Эйнштейна. К настоящему времени предельная чувствительность была достигнута на площади, равной доли зрения ППВР ($\Omega \approx 3,4 \cdot 10^{-5}$ ср) при наблюдении с экспозицией 300 000 с. При таких экспозициях чувствительность растет лишь пропорционально корню квадратному из времени и, кроме того, становятся значительными систематические эффекты, обусловленные непостоянством коэффициента усиления и квантовой эффективности приемника ППВР. Таким образом, 10-кратное увеличение чувствительности при наблюдениях на обсерватории им. Эйнштейна недоступно, и нам остается ожидать создания обсерватории АХАФ, которая позволит легко достичь требуемого уровня чувствительности. В дополнение к рентгеновским наблюдениям и регистрации слабых источников при обзорах значительное внимание уделяется отождествлению рентгеновских источников с объектами, наблюдаемыми в оптическом и радиодиапазоне. Из 15 источников, упоминавшихся выше, семь предварительно отождествлены следующим образом: четыре — с ранее неизвестными квазарами (красные смещения 0,5; 1,9; 1,4 и 2,6); два — со слабыми галактиками, являющимися радиисточниками; один — со слабой галактикой. Что же касается неототождествленных источников, то для шести из них не найдено оптического объекта — кандидата на отождествление — ярче 19^m , а у двух оставшихся велика неопределенность измеренных координат ($\sim 1'$), что затрудняет отождествление. Можно предполагать, что некоторые из этих источников являются квазарами, однако необходимые для такого заключения спектральные наблюдения еще не выполнялись.

Обзор с умеренной чувствительностью привел к обнаружению 16 рентгеновских источников на уровне значимости не ниже 5σ , которые, по всей вероятности, являются внегалактическими. Для этой выборки распределение источников по интенсивности дает значение $\alpha \approx 1,35 \pm 0,3$ при плотности источников с потоками выше 10^{-13} эрг/(см²·с), равной $6,1 \cdot 10^3$ ср⁻¹. Для источников, зарегистрированных при «глубоких» обзорах, значения потока составляют от $1,3 \cdot 10^{-14}$ до $2 \cdot 10^{-13}$ эрг/(см²·с). Данные указаний двух видов обзоров согласуются друг с другом в диапазоне перекрывающихся значений потока около

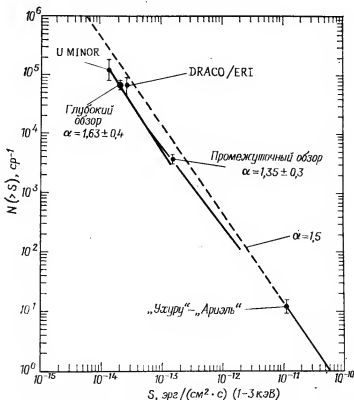


Рис. 29. Распределение рентгеновских источников по интенсивности. Линии, отражающие результаты промежуточного и глубокого обзоров, получены применением метода максимального правдоподобия в указанном диапазоне значений потока. Вертикальные отрезки показывают неопределенность нормировки. Приводятся также ранее публиковавшиеся данные глубокого обзора в Драконе—Эридане и интегральный результат очень глубокого обзора в Малой Медведице.

10^{-13} эрг/(см²·с). Если построить общее распределение источников по интенсивности на основе обзоров обсерватории им. Эйштейна, то полный вклад дискретных источников с потоками выше $1,3 \cdot 10^{-14}$ эрг/(см²·с) составит около 30 % яркости фона.

Приведенные выше результаты иллюстрируются рис. 29, который представляет собой график зависимости $\lg N(>S)$ от $\lg S$. Хотя эти результаты пока надо считать предварительными, из графика вытекает, что для самых сильных и близких внегалактических источников ожидаемое распределение следует классической евклидовой модели с $\alpha = 1,5$. При включении в подсчеты

более слабых и далеких источников существенными становятся космологические эффекты.

Влияние медленно эволюционирующих источников проявляется в уменьшении наблюдаемого наклона кривой распределения, характерном для обзора с умеренной чувствительностью. При более низких значениях потока возрастает вклад в распределение быстро эволюционирующих источников, особенно квазаров, и наклон увеличивается. Однако далее подсчеты должны обнаруживать обратную тенденцию, т. е. уплощение кривой в соответствии с ограничением, обусловленным интенсивностью фона. Как отмечалось выше, такая тенденция должна наблюдаться при значениях потока в 10 раз ниже предела чувствительности, достигнутого в настоящее время.

7. Рентгеновские обсерватории будущего

Основное условие успешного развития рентгеновской астрономии в будущем состоит в создании базы для постоянных наблюдений в рентгеновской области спектра. Как можно отметить, в определенном смысле рентгеновская астрономия стала настолько важной, что ею должны заниматься не только рентгеновские астрономы. В свое время, когда рентгеновские наблюдения касались лишь ограниченного круга объектов, например галактических рентгеновских источников, было естественно рассматривать каждое такое наблюдение как отдельный эксперимент. Отсутствие непрерывности наблюдений, связанное с применением инструментов на спутниках, не рассчитанных на управление и обслуживание, не вызывало особого беспокойства у астрономического сообщества в целом. При наличии необходимого финансирования отдельные экспериментальные группы чередовались, сменяя друг друга через короткие промежутки времени.

Однако опыт эксплуатации обсерватории им. Эйнштейна, использовавшейся сотнями посторонних наблюдателей, совершенно ясно показал необходимость крупных и сложных инструментов, постоянно доступных для всех астрономов. Эта очевидная необходимость побудила специалистов по рентгеновской астрономии выдвинуть идею создания постоянных рентгеновских обсерваторий, таких, как AXAF, играющих ключевую роль в программе рентгеновских исследований. По замыслу, эти обсерватории должны выводиться на орбиту и обслуживаться транспортным космическим кораблем многоразового действия и по своим характеристикам удовлетворять требованиям всех астрономов. Как и в случае крупных наземных общенациональных обсерваторий, а также космического телескопа, руковод-

ство должно осуществляться независимой организацией, представляющей интересы всего астрономического сообщества.

Помимо этого большого проекта планируется осуществление и более специализированных спутниковых программ, дополняющих исследования с общенациональных обсерваторий. Такие программы, выполняемые обычно отдельными группами или объединениями университетов под руководством одного ведущего исследователя, составили основу быстрого прогресса рентгеновской астрономии в течение последних двух десятилетий. Необходимо продолжать поддержку таких программ, поскольку они не только сами по себе представляют значительный научный интерес, но и обеспечивают научную и технологическую базу для создания обсерваторий будущего. Наиболее неотложными из исследований такого рода представляются расширение диапазона рентгеновских наблюдений в сторону более высоких энергий, наблюдения некоторых рентгеновских источников с высоким разрешением в течение длительных интервалов времени, а также детальные спектроскопические исследования отдельных источников.

Ниже приводится описание двух наиболее важных программ, запланированных НАСА, которые предусматривают создание усовершенствованной установки для рентгеновских астрофизических исследований AXAF (Advanced X-ray Astrophysics Facility) и модульной системы рефлекторов большой площади LAMAR (Large Area Modular Array of Reflectors).

7.1. Усовершенствованная установка для рентгеновских астрофизических исследований AXAF

Преемником обсерватории им. Эйнштейна станет усовершенствованная установка для рентгеновских астрофизических исследований AXAF. Проект этой установки изучался с 1977 г. рабочей группой НАСА, включавшей представителей всех исследовательских коллективов США, а также специалистов из Англии, ФРГ и Японии, занимавшихся проблемами рентгеновской астрономии. Технологические исследования проводились в течение того же периода Центром космических полетов им. Маршалла и его субподрядчиками. Разработка принципиального проекта (фаза А) была завершена в 1978 г., и в настоящее время проводятся более детальные исследования (фаза В). Текущими планами предусматривается, что заключительная фаза проектирования и изготовление оборудования начнутся в 1984—1985 гг., а вывод AXAF на орбиту произойдет в 1988—1989 гг.

На первый взгляд AXAF представляет собой увеличенную копию обсерватории им. Эйнштейна. Однако проектом пред-

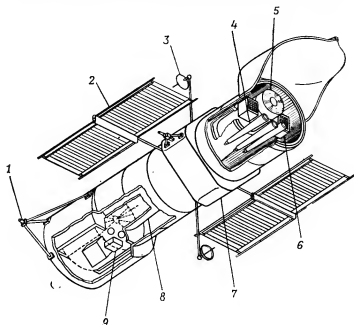


Рис. 30. Схематическое изображение усовершенствованной установки для рентгеновских астрофизических исследований АХАФ. Указаны основные системы. 1 — узел крепления к ТКК для вывода на орбиту; 2 — солнечные батареи; 3 — антенна; 4 — система наведения; 5 — зеркала; 6 — мониторный счетчик; 7 — корпус спутника; 8 — оптическая скамья; 9 — приборы фокальной плоскости.

усмотрены важные конструктивные изменения, обеспечивающие существенное повышение эффективности обсерватории. Согласно текущим планам, рентгеновская оптическая система будет иметь диаметр 1,2 м и фокусное расстояние 10 м. Угловое разрешение в центре поля зрения составит 0,5", эффективная площадь зеркала будет в четыре раза больше, чем у обсерватории им. Эйнштейна, и к тому же зеркало будет способно отражать рентгеновское излучение с энергией фотонов до 10 кэВ. Учитывая некоторое улучшение характеристик приборов, располагаемых в фокальной плоскости, можно ожидать повышения чувствительности при регистрации слабых точечных источников в 100 раз по сравнению с обсерваторией им. Эйнштейна. После вывода на орбиту с помощью транспортного космического корабля многоразового использования АХАФ будет находиться в режиме свободного полета, причем пополнение ресурсов будет производиться прямо на орбите (рис. 30). Обсерватория будет

управляться как общенациональная научная установка и рассчитана на время жизни 10—15 лет. Комплект приборов, расположенных в фокальной плоскости, будет включать в себя панорамный приемник высокого разрешения, высокочувствительный панорамный приемник умеренного разрешения, твердотельный спектрометр и спектрометр высокого разрешения. Новые возможности откроет применение поляриметра, а также объективной решетки, в десять раз более эффективной, чем на обсерватории им. Эйнштейна. Изготовление такой решетки вполне реально даже при существующей технологии. В табл. 4 и 5 приведены расчетная чувствительность при регистрации точечных источников и качество фокусирования внеосевых пучков зеркалом AXAF.

В проекте AXAF учтен опыт, полученный при изготовлении, сборке и юстировке зеркал обсерватории им. Эйнштейна. Кон-

Таблица 4

Регистрация точечных источников обсерваторией AXAF
(время наблюдений 10^5 с)

z	Расстояние	Объект	Минимальная регистрируемая рентгеновская светимость, эрг/с	Линейный размер, соответствующий $1''$
	150 пс	Звезда	$1 \cdot 10^{27}$	50 а. е.
	0,7 Мпс	Точечный источник в М 31	$2 \cdot 10^{34}$	3,5 пс
0,003	19 Мпс	Точечный источник в скоплении галактик в Деве	$1 \cdot 10^{37}$	100 пс
0,05	300 Мпс	Нормальная спиральная галактика	$3 \cdot 10^{39}$	1,5 кпс
0,16	1000 Мпс	Активная галактика в скоплении галактик в Гидре	$3 \cdot 10^{40}$	5 кпс
7	$2 \cdot 10^5$ Мпс	Квazar	$1 \cdot 10^{45}$	1 Мпс
<i>Примеры известных рентгеновских источников</i>				
	Нормальная звезда:	Солнце	$5 \cdot 10^{27}$	
	Остаток Сверхновой:	Петля в Лебедь	$2 \cdot 10^{36}$	
	Точечный источник:	Sco X-1	$2 \cdot 10^{37}$	
	Двойной источник:	Сеп X-3	$4 \cdot 10^{37}$	
	Нормальная спиральная галактика:	Млечный Путь	$5 \cdot 10^{39}$	
	Активная галактика:	M 87	$3 \cdot 10^{43}$	
	Квazar:	3C 273	$5 \cdot 10^{45}$	

Таблица 5

Качество изображения, обеспечиваемое зеркалами AXAF
и обсерватории им. Эйнштейна

	Отклонение от главной оптической оси, мин. дуги			
	0	5	10	20
<i>Геометрически идеальное зеркало AXAF</i>				
Среднеквадратичный диаметр кружка рассеяния, сек. дуги	0	2	—	—
Диаметр кружка, собирающего 50 % энергии излучения, сек. дуги	0	2	5	20
<i>Зеркало обсерватории им. Эйнштейна</i>				
Диаметр кружка, собирающего 50 % энергии излучения, сек. дуги:				
при энергии фотонов 0,28 кэВ	8	10	25	—
при энергии фотонов 3 кэВ	20	25	40	—
Ширина функции отклика на уровне половины максимума, сек. дуги	3,5	3,5	5	—

струкция зеркал обеспечивает высокую эффективность системы при энергиях фотонов в несколько килоэлектронвольт и достаточно сильный сигнал в диапазоне энергий выше 7 кэВ, где находятся рентгеновские линии ионизованного железа — элемента, очень важного для астрофизики.

Для достижения чувствительности, в 100 раз более высокой, чем у обсерватории им. Эйнштейна, необходимо существенное улучшение характеристик приемника высокого разрешения, располагаемого в фокальной плоскости. Значительный прогресс, наблюдаемый в последнее время в технологии производства детекторов, вселяет уверенность, что приемники высокого разрешения AXAF позволят достигнуть высокого углового разрешения, высокой квантовой эффективности и умеренного спектрального разрешения по всему полю зрения. По-видимому, в зависимости от конкретных требований при наблюдениях будет использоваться та или иная комбинация приемников.

7.2. Модульная система рефлекторов большой площади LAMAR

Модульная система рефлекторов большой площади LAMAR представляет собой инструмент, обладающий высокой чувствительностью и умеренной разрешающей способностью, построенный в модульной форме. Каждый модуль состоит из небольшого

телескопа и приемника излучения, причем вся установка, состоящая из многих одинаковых модулей, занимает гораздо меньший объем, чем очень крупный телескоп, эквивалентный по чувствительности. Создание такой модульной системы не требует разработки новой технологии. Для достижения большой площади, собирающей излучение, можно построить систему, число модулей в составе которой определяется лишь конструктивными и финансовыми ограничениями.

В настоящее время НАСА планирует разработку эксперимента под эгидой ведущего исследователя, программа которого предусматривает вывод на орбиту опытного образца модульной системы с помощью транспортного космического корабля многоразового использования. Предполагается, что в течение последующих полетов будет произведена доработка телескопов и приемников излучения, а в конце 80-х годов будет осуществлена сборка на орбите модульной системы с очень большой эффективной площадью и продолжительным временем жизни, которой будет придан статус общенациональной научной установки. Программа наблюдений будет, по всей вероятности, включать в себя: 1) обзор всего неба с гораздо более высокой, чем ранее, чувствительностью; 2) построение карт протяженных областей мягкого рентгеновского излучения, обладающих низкой поверхностной яркостью; 3) исследование переменного рентгеновского излучения и спектров удаленных источников.

На рис. 31 представлено схематическое изображение системы LAMAR, предназначенной для установки на спутнике «Спейс-слаб». Система состоит из 24 элементов, каждый из которых представляет собой небольшой телескоп с рентгеновской линзой типа Киркпатрика—Баэза, оснащенный панорамным пропорциональным счетчиком, аналогичным установленному на обсерватории им. Эйнштейна. Гибкость модульной конструкции позволяет значительно расширить систему и довести число модулей в составе единого блока до 64. Ожидаемая эффективная площадь 200-модульной системы с оптикой Уолтера I типа показана на рис. 32 в зависимости от энергии фотонов.

Если наблюдения площади в один квадратный градус будут занимать 100 с, а для полезных наблюдений будет использовано 50 % наличного времени, то обзор всего неба будет выполнен в течение трех месяцев. LAMAR позволит наблюдать источники с предельным потоком, соответствующим 0,016 импульс/с для спутника «Ухуру». Экстраполируя зависимость $\lg N - \lg S$, можно сделать вывод, что будет зарегистрировано примерно 20 000 внегалактических рентгеновских источников. Точность определения положения этих источников составит около 0,5', чего вполне достаточно для уверенного отождествления большинства из них.

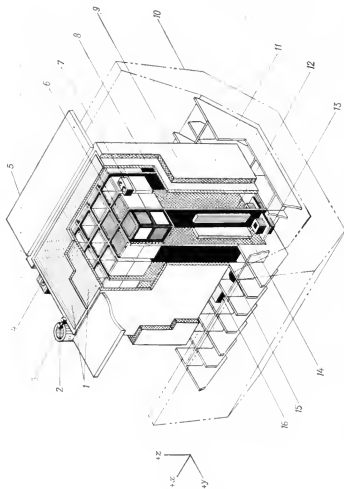


Рис. 31. Схематическое изображение модульной системы рефлекторов большой площади LAMAR. 1 — теплозащитный коллиматор; 2 — искусственная звезда; 3 — система наведения (звездный датчик); 4 — телевизионная камера; 5 — защитная крышка; 6 — система зеркал; 7 — патрульный детектор для выключения аппаратуры при прохождении Южно-Атлантической аномалии и датчик ярких объектов; 8 — внешний кожух; 9 — теплоизоляция; 10 — сегмент платформы; 11 — основание; 12 — крестовидная конструкция; 13 — панорамный пропорциональный счетчик; 14 — электроника; 15 — газовый резервуар; 16 — главный узел электронного оборудования.

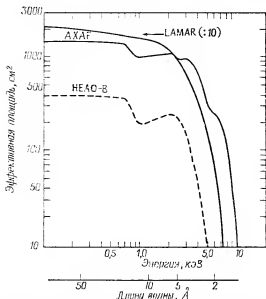


Рис. 32. Зависимость эффективной площади от энергии для трех рентгеновских астрофизических установок. Кривая HEAO—В показывает эффективную площадь, реально достигнутую обсерваторией им. Эйнштейна. Кривая AXAF соответствует основным характеристикам проекта AXAF. Кривая LAMAR соответствует характеристикам, предложенным для системы LAMAR, предназначенной для функционирования в режиме свободного полета. (Для сравнения с другими кривыми числовые значения, соответствующие кривой LAMAR, уменьшены в 10 раз.)

Наиболее подходящим применением системы LAMAR, по-видимому, окажется измерение спектров и вариаций интенсивности слабых внегалактических источников, для которого обсерватория AXAF мало приспособлена. Построение изображений необходимо для наблюдения слабых источников и предотвращения «путаницы», а большая эффективная площадь инструмента требуется для измерения спектров и регистрации значительных быстрых вариаций интенсивности. Основными объектами наблюдений будут ядра активных галактик, рентгеновские двойные в соседних галактиках и, возможно, звездные короны в нашей Галактике.

8. Рентгеновские наблюдения и астрономия

С запуском на орбиту обсерватории им. Эйнштейна рентгеновская астрономия вышла на один уровень с радио- и оптической астрономией. На рис. 33 показана чувствительность крупных астрономических инструментов в разные эпохи.

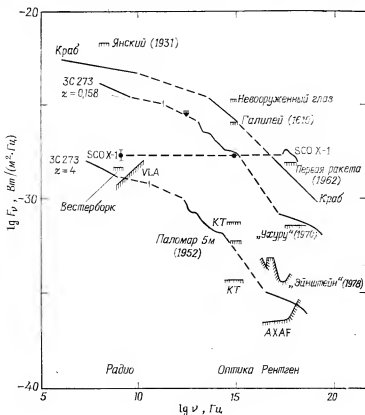


Рис. 33. Спектры некоторых характерных объектов (зависимость плотности потока на единицу частоты от частоты). Показанные уровни чувствительности различных инструментов свидетельствуют о значительном прогрессе, достигнутом в последнее время в разных областях астрономических исследований. Этот рисунок иллюстрирует общность научных задач радио-, оптических и рентгеновских наблюдений и взаимодополняющий характер программы AXAF по отношению к КТ и VLA.

Благодаря сравнительно высокой прозрачности межзвездной среды для рентгеновских лучей и относительной легкости фокусирования и регистрации фотонов высоких энергий в этом спектральном диапазоне рентгеновские наблюдения можно распространить на область больших красных смещений ($1 < z < 10$). Их можно использовать для выделения наиболее интересных объектов, таких, как очень удаленные КЗО, скопления галактик, а, возможно, и протогалактик, с целью дальнейшего изучения в оптическом, радио- и рентгеновском диапазонах. Мы пола-

гаем, что до конца этого столетия астрономические исследования должны основываться на результатах наблюдений во всех участках электромагнитного спектра. Такие наблюдения позволят ответить на важные вопросы, касающиеся плотности вещества во Вселенной, образования галактик и скоплений, эволюции звезд и галактик, конечных стадий звездной эволюции, а также природы процессов, протекающих внутри ядер галактик. В выяснение всех этих вопросов рентгеновская астрономия вносит и будет вносить важный, а иногда и решающий вклад.

Выражения признательности

Исследования, о которых сообщалось в этой статье, являются плодом совместной деятельности специалистов из четырех организаций, объединенных в консорциум: Массачусетского технологического института, Астрофизической лаборатории Колумбийского университета, Центра космических полетов им. Годдарда и Гарвардско-Смитсоновского астрофизического центра. Нам хотелось бы поблагодарить всех наших коллег за разрешение использовать их результаты.

Хотя невозможно перечислить всех участвовавших в создании обсерватории им. Эйнштейна, нам хотелось бы отметить помощь и поддержку, оказанные Р. Халперном и его коллегами из НАСА, руководство Ф. Спiera и административной группы Центра космических полетов им. Маршалла, а также содействие Центра им. Кеннеди и Центра им. Годдарда. Их деятельность во время вывода обсерватории на орбиту и ее последующего функционирования была и остается важным условием успешного выполнения программы исследований.

Неоценимую роль сыграли также разработки, выполненные промышленными фирмами-подрядчиками по проектированию, изготовлению, монтажу и отладке космического аппарата (TRW), научного оборудования («Америкен сайенс энд энжиниринг»), рентгеновского зеркала («Перкин—Элмер»), системы слежения (электронно-оптический центр «Хонивелл»), оптической скамьи («Дженерал дайнэмикс»), пропорциональных счетчиков (LND), механических узлов («Паркер—Ханнифин», «Лорд», «Аэрофлекс», «Эр энд ка пресижи машин», «Астронотик индастриз»), низковольтных и высоковольтных источников питания («Спейстэк», «Мэтрикс рисерч энд дивелопмент»), а также криостата («Болл бразерс»).

Нам хотелось бы отметить постоянную поддержку, оказанную этому проекту со стороны администрации и специалистов четырех организаций, входящих в научный консорциум: Гарвардско-Смитсоновского астрофизического центра, Астрофизической лаборатории Колумбийского университета, Центра кос-

мических полетов им. Годдарда и Массачусетского технологического института.

Исследования финансировались контрактами НАСА NAS 8-30751, NAS 8-30752 и NAS-30753.

Литература

1. Arnett W. D. *Astrophys. J.*, **195**, 727, 1975.
2. ASE-106. An X-ray detector for high-resolution mapping of the Sun from S-16A. Prepared for NASA, January 1961.
3. ASE-311. Experiment to measure solar X-radiation from the pointing section of the S-57 satellite. Prepared for NASA, September 1962.
4. ASE-623. A proposal for the initial phase of a program to develop a high-resolution X-ray telescope for AOSO. Prepared for NASA, 4 June 1964.
5. ASE-2410-III. Technical proposal summary for a Large orbiting X-ray telescope for the HEAO. Prepared for NASA, September 1970.
6. Bahcall J. N., Soneira R. M. *Astrophys. J.*, **246**, 122—135, 1981.
7. Becker R. H. et al. *Astrophys. J.*, **234**, L73, 1979.
8. Blake R. L. et al. *Astrophys. J.*, **137**, 3, 1963.
9. Bonoli F. et al. *Astron. Astrophys.*, **90**, L10—L12, 1980.
10. Borowski C. J., Kopp M. K. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* NS-19, 161, 1972.
11. Bowles J. A. et al. *Journ. of Physics E., Scientific Instrum.*, **7**, 191, 1974.
12. Braccisi A. et al. *Astron. Astrophys.*, **85**, 80, 1980.
13. Canizares C. et al. *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **106**, 154, 1977.
14. Chase R. C., Van Speybroeck L. P. *Appl. Opt.*, **12**, 1042, 1973.
15. Chevalier R. A., Kirschner R. P. *Astrophys. J.*, **219**, 931, 1978.
16. Compton A. H., Allison S. K. *X-rays in theory and experiment*. New York: Van Nostrand, 1935.
17. Dietz P. W., Bennett J. M. *Appl. Opt.*, **5**, 881, 1966.
18. Donaghy J., Canizares C. *IEEE Trans. NS*—25, 459, 1978.
19. Dufour R. J., van den Bergh S. *Astrophys. J.*, **226**, L73, 1978.
20. Fabian A. C. et al. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1980, в печати.
21. Fabricant D., Lecar M., Gorenstein P. *Astrophys. J.*, **241**, 522, 1980.
22. Forman W. et al. *Astrophys. J.*, **243**, L1—L133, 1981.
23. Forman W. et al. *Ibid.*, **234**, L27, 1979.
24. Giacconi R. et al. *Ibid.*, **234**, L1, 1979.
25. Giacconi R. et al. *Ibid.*, **230**, 540, 1979.
26. Giacconi R. et al. *J. Opt. Soc. Amer.*, **55**, 345—347, 1965.
27. Giacconi R. et al. *Space Sci. Rev.*, **9**, 3—57, 1969.
28. Giacconi R. et al. *Astrophys. J.*, **142**, 1265, 1965.
29. Giacconi R., Rossi B. J. *Geophys. Res.*, **65**, 773, 1960.
30. Gorenstein P. et al. *IEEE Trans. NS*—22, 616, 1975.
31. Grindlay J. et al. 1981, в печати.
32. Harnden F. R., Jr., et al. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **11**, 789, 1980.
33. Harvey P. et al. *IEEE Trans. NS*—23, 487, 1976.
34. Helfand D. J., Chanan G. A., Novick R. *Nature*, **283**, № 5745, 337—343, 1980.
35. Henry J. P. et al. *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **106**, 196, 1977.
36. Humphrey A. et al. *IEEE Trans. NS*—25, 445, 1978.
37. Jones C. et al. *Astrophys. J.*, **234**, L9, 1979.
38. Joyce R. et al. *IEEE Trans. NS*—25, 453, 1978.
39. Kirkpatrick P., Baez A. V. *J. Opt. Soc. Amer.*, **38**, 766, 1948.
40. Kron R. G. In *Two dimensional photometry*: ESO Workshop, ed. P. O. Lindblad, H. van der Laan, Geneva, 1980.
41. Lamb S. A. *Astrophys. J.*, **220**, 186, 1978.

42. Ledger A. M. Proc. Soc. Photo—Opt. Instrum. Eng., **184**, 176, 1979.
43. Abbot D. C. et al. Astrophys. J., **238**, 196—202, 1980.
44. Lindsay J. C., Giacconi R. High resolution (5 arcsec) X-ray telescope for advanced orbiting solar observatory. Goddard Space Flight Cent. Dok. X-614-63-112, 1963.
45. Mangus J. D., Underwood J. H. Appl. Opt., **8**, 95, 1969.
46. Mathur D. P. et al. Proc. Soc. Photo—Opt. Instrum. Eng., **184**, 139, 1979.
47. Murdock H. S., Crawford D. F., Jauncey D. L. Astrophys. J., **183**, 1, 1973.
48. Murray S. S. In X-ray Astronomy/Proc. HEAD/AAS, Jan. 1980: Cambridge, Mass. Meet., ed. R. Giacconi: Dordrecht, Reidel, in press.
49. Murray S. et al. Astrophys. J., **234**, L69, 1979.
50. NASA SP-213. A long-range program in Space astronomy. Position paper of the Astronomy Missions Board, July 1965.
51. Nat. Acad. Sci. Publ. 1403. Space Research: Directions for the Future. Rept. of a Study by the Space Sci. Board, Nat. Acad. Sci., 1966.
52. Perrenod S. C., Henry J. P. Astrophys. J. (Lett.), **1980**, в печати.
53. Pravdo S. H., Smith B. W. Ibid., **234**, L195, 1979.
54. Schreier E. J. et al. Ibid., **234**, L39, 1979.
55. Tananbaum H. et al. Ibid., **234**, L9, 1979.
56. Tsuruta S. International School of Astrophysics, 5th Course, X-ray Astronomy/Erice, Sicily, 1979.
57. Vaiana G. S. et al. Astrophys. J., **1980**, в печати.
58. Vaiana G. S., Krieger A. S., Timothy A. F. Solar Physics, **32**, 81—116, 1973.
59. Vaiana G. S. et al. Science, **161**, 564, 1968.
60. Vaiana G. S. et al. Space Sci. Instrum., **3**, 19, 1977.
61. Van Speybroeck L. In Proc. X-ray Optics Symp., Mullard Space Sci. Lab., Univ. College, London, ed. P. W. Sanford, April 1973.
62. Van Speybroeck L. In X-ray Astronomy, Proc. HEAD/AAS, Cambridge, Mass. Meet., ed. R. Giacconi. Dordrecht, Reidel, 1980.
63. Van Speybroeck L., Chase R. Appl. Opt., **11**, 440, 1972.
64. Van Speybroeck L. et al. Astrophys. J., **234**, L45, 1979.
65. Winkler P. F. et al. Astrophys. J., **246**, 1981, в печати.
66. Wolter H. Ann. Physik, **10**, 94, 1952.
67. Young P. S. Proc. Soc. Photo—Opt. Instrum. Eng., **184**, 131, 1979.
68. Zamorani G. et al. Astrophys. J., **1980**, в печати.

Предметный указатель

Антенна VLA 16, 29, 34, 51, 57
Апертурный синтез 16, 20, 32
Астроклимат 122, 143, 152, 154
Астрометрия 61

Башня МЗТ 84, 102, 123
Большое Магелланово Облако 274

Ветер звездный 65, 66
Воливод 35, 39, 42, 50
Выброс 69, 72, 290
Вычислительная система МЗТ 119,
— — КТ 190
— — обсерватории им. Эйштейна 267
— — VLA 43, 53

Галактика кометообразная 70
— сейфертовская 68, 75, 289
— спиральная 68, 76, 281, 289
— типа cD 287, 289
Галлея комета 177
Герцишпрунга—Рессела диаграмма
271
Гидрирование 83, 106, 114, 129, 131
— точное 186, 205

Диаграмма направленности 16, 21, 25,
57, 65
Диапазон динамический 56

Задержки линия 43
Звезда *Вольфа—Райе* 65
— гидрировочная 114, 186
— искусственная 111, 114, 132, 234
— нейтронная 274, 279
— пекулярная 69
Звездная корона 270
Зеркало главное КТ 184
— — МЗТ 84, 105, 115
— — VLA 34
— — рентгеновское 236
— — составное 87, 142
Зональный свет 179

ИК-наблюдения 141
ИК-фотометр МЗТ 63
Интерферограмма 110

Интерферометр МЗТ 118, 127
— обсерватории Грин-Бэнк 30, 43

Калибровка 210, 279
— рентгеновская 242, 248, 258
Камера высокого разрешения 194, 223
— слабых объектов 169, 186, 199
— широкоугольная 186, 196, 198
Качество изображения 86, 111, 152
— — МЗТ 118, 123
— главного зеркала 108, 301
Квазар 74, 137, 142, 292, 300
Квазизвездный объект (КЗО) 74, 289.
См. также Квазар
Кёстера призма 176, 187
«Коперник» 159
Корона звездная 270
Космология 79, 297

Мазер 62
Место установки МЗТ 82, 95, 122
— — VLA 16, 27, 49
Микроканальная пластина (МКП) 246
Мониторинг альтазимутальный 34, 86,
102
— — МЗТ 100

Обзор рентгеновский 294, 302
Область III 64, 67, 281
Оправа зеркала 240
Остаток сверхновой 256, 274, 300
Отказ «терпимый» 231, 233
— фильтра 229
Отклика функция 259
Отношение сигнала к шуму 151, 165

Панорамный приемник высокого раз-
решения 243, 246, 281
Панорамный пропорциональный счет-
чик 243, 284
Параметры КТ 185
— МЗТ 106
— VLA 19, 31, 56
Планеты 60, 200
Плутон 141
Покрытие зеркала 174, 185, 222, 238
— МКП 247

- Покрытие ППС 250
 Поле зрения 21, 28, 233, 243, 219
 Поляризация 21, 24, 68
 Потеря массы 65
 Приборы научные КТ 163, 165, 178, 192
 — МЗТ 126, 134
 Проект КТ 155
 — МЗТ 92
 — AXAF 298
 — VLA 26, 31, 47
 Пульсар 274, 280
 «Путаница» 22, 304
- Радиогалактика 69, 289
 Разрешение приборов 243, 246, 252
 — рентгеновского телескопа 219, 226, 236
 — VLA 16, 26, 56
 Раскопки археологические 50
 Рефракция 154
Ричи—Кретьена система 173, 175
Роза круг 254, 255
- Система LAMAR 301
 Скопление галактик 70, 282
 — шаровое 273
 Солнечная система 59
 Солнце 59, 208, 219, 300
 Спекл-интерферометрия 140, 154, 200
 Спектрограф высокого разрешения 191, 202
 — МЗТ 126
 — низкого разрешения 175, 191
 — слабых объектов 200, 202
 Спектрометр кристаллический 244, 254
 — твердотельный 243, 253, 279
 — с объективной решеткой 245
 Спектроскопия 21, 62, 136
 Спутник ретранслятор 177, 211
- Спутник HEAO 216, 227, 243
 — IUE 160, 161
 — OAO 158, 223
 — OSO 220
- Телескоп гид 83, 106, 114
 — кассегреновский 983, 99
 — космический (КТ) 147
 — многозеркальный (МЗТ) 82
 — рентгеновский 216
 — VLA 15
 Транспортёр VLA 38, 48, 51
 Туманность Андромеды 249, 280
- Угол обзора 16, 21, 23, 56
 Управление работой КТ 174
 — обсерватории им. Эйнштейна 257
 — VLA 11
Уолтера оптика 218, 302
 Установка AXAF 230, 270, 272, 274, 281, 289, 294, 298
 «Ухуру» 217, 221, 228, 294, 302
- Чувствительность МЗТ 117
 — рентгеновского телескопа 219, 231
 — AXAF 269, 289, 300
 — LAMAR 301
 — VLA 29, 56
- Энергоснабжение КТ 190
 Эффекты атмосферные 28, 152
 Эффективность VLA 23, 25
 — отражения 218, 220
 Эффект «путаницы» (см. «Путаница»)
- Южно-Атлантическая аномалия 208, 266
 Юпитер 60, 61
 Юстировка 111, 114, 242

Содержание

Предисловие редактора перевода	5
Предисловие	10
Многоэлементный радиотелескоп VLA. Д. С. Хишен	15
1. Введение	15
2. Исходные параметры и принципы устройства	19
3. Проектирование систем	33
4. Строительство	48
5. Перспективы и цели	55
6. Заключение	79
Литература	80
Многозеркальный телескоп. Дж. М. Беккерс и др.	82
1. Введение	82
2. Прежние телескопы с составными объективами	87
3. Первые этапы проекта МЗТ	92
4. Вспоминает Р. Дж. Веймани	93
5. Устройство и качество работы МЗТ	98
6. Научные приборы МЗТ	126
7. Астрономические исследования с МЗТ	136
8. Многозеркальные телескопы будущего	142
9. Выводы	146
Литература	147
Космический телескоп. Ч. Р. О'Делл	149
1. Введение	149
2. Ограничения наземных оптических телескопов	150
3. История проекта	155
4. Ограничения проекта	170
5. Планируемая конструкция спутника	182
6. Научные приборы	192
7. Организация наблюдений	205
8. Выбор научных задач для КТ	213
Литература	215

Обсерватория им. Эйнштейна и будущее рентгеновских телескопов. Р. Джнакони и др.	216
1. Введение	216
2. Принципы проектирования обсерватории	231
3. Зеркала	236
4. Приборы, установленные в фокальной плоскости	243
5. Работа обсерватории	257
6. Научные результаты	269
7. Рентгеновские обсерватории будущего	297
8. Рентгеновские наблюдения и астрономия	304
Литература	307
Предметный указатель	309

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ

Под редакцией Джеффри Бербилжа и Аделанды Хьюнт

Научный редактор М. Ф. Путов
Мл. научный редактор И. А. Гревцова
Мл. редактор Н. В. Коринейко
Художник Е. Н. Урусов
Художественный редактор М. Н. Кузьмина
Технический редактор И. М. Кренделева
Корректор В. С. Соколов

ИБ № 3839

Сдано в набор 29.08.83. Подписано к печати 2.02.84.
Формат 60×90/16=9,75 бум. л. Бумага типографская № 2.
Гарнитура литературная. Печать высокая.
Усл. печ. л. 19,5. Усл. кр.-отт. 19,5. Уч.-изд. л. 19,94.
Изд. № 27/3202. Тираж 3200 экз. Зак. 321. Цена 3 р. 30 к.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР». Москва, 1-й Рижский пер., 2.

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного
Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга»
им. Евгения Соколова Союзполиграфпрома при Государст-
венном комитете СССР по делам издательства, полиграфии
и книжной торговли.

190000, г. Ленинград, Прачечный переулок, 6.



SCORBY
OFFICE

BOOK

